Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе



Библиотека учителя физики

2

Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе



Библиотека учителя физики

Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе

Часть 2

Колебания и волны. Оптика. Физика атома.

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ

Под редакцией А. А. ПОКРОВСКОГО

Издание 3-е, переработанное

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1979

В. А. БУРОВ, Б. С. ЗВОРЫКИН, А. П. КУЗЬМИН,
А. А. ПОКРОВСКИЙ, И. М. РУМЯНЦЕВ

Рекомендовано к изданию Главным управлением школ Министерства просвещения СССР

Д31 **Демонстрационный** эксперимент по физике в средней школе: Пособие для учителей /В. А. Буров, Б. С. Зворыкин, А. П. Кузьмин и др.; Под ред. А. А. Покровского.— 3-е изд., перераб.— М.: Просвещение, 1979.— (Б-ка учителя физики).— Ч. 2. Колебания и волны. Оптика. Физика атома.— 287 с., ил.

В книге изложены методика и техника физического эксперимента по колебаниям и волнам, оптике, физике атома.

Д $\frac{60501-285}{103(03)-79}$ подписное

ББК 22.3
53

ПРЕДИСЛОВИЕ

В эту книгу вошли демонстрационные опыты по колебаниям и волнам, оптике и физике атома. Почти все опыты относятся к курсу физики X класса средней школы. Только в некоторых местах, когда надо подчеркнуть логику развития эксперимента, для повторения кратко напоминаются опыты, относящиеся к восьмилетней школе.

Содержание опытов, а также порядок их расположения соответствуют действующей программе и стабильному учебнику.

Авторы не стремились везде и во всех деталях истолковывать физику демонстрируемых явлений и закономерностей. Эту задачу решают соответствующие курсы физики. В описаниях подробно раскрываются методика и техника эксперимента.

Форма описания опытов по всем разделам выдержана в основном одинаковая, а методика и техника показа рекомендуется разнообразная в зависимости от содержания и назначения опыта. Кроме опытов качественного характера, иллюстрирующих рассказ учителя, введены опыты, которые количественно подтверждают ту или иную закономерность. Описаны также опыты, которые служат экспериментальными задачами или подготавливают учащихся к выполнению лабораторных работ в практикумах.

В виде исключения, где авторы нашли это необходимым, описаны и варианты опытов.

При проведении некоторых опытов наряду с экспериментом применяются учебные таблицы, кинокольцовки, кинофильмы. Этот иллюстративный материал органически связывается с опытами и вводится в описание для их развития и дополнения.

При разработке демонстрационных опытов применялось учебное оборудование по физике, выпускаемое нашей промышленностью. В тех случаях, когда этого оборудования оказывалось

недостаточно, авторы применяли известные самодельные приборы.

При подборе оборудования для этой книги соблюдался принцип комплектности, заключающийся в том, что один и тот же прибор в большинстве случаев применяется не в одном какомлибо опыте, а в нескольких разнообразных установках.

Все новые опыты и приборы для первого издания разрабатывались авторами в лаборатории обучения физике НИИ содержания и методов обучения АПН СССР, а для последующих изданий — в лаборатории учебного оборудования по физике НИИ школьного оборудования и технических средств обучения АПН СССР.

Установки для каждого опыта собирались в различных вариантах, а затем выбирались методически лучшие и более доступные средней школе. Окончательные варианты проверялись в школе № 315 Москвы и в школе № 98 поселка Кратово, Московской области. По материалам проверки делались описания опытов и рисунки установок в таком виде, в каком они должны быть подготовлены учителем на демонстрационном столе.

Чтобы легче было собирать и объяснять некоторые сложные установки по электричеству, в описаниях приведены схемы, которые имеют методическое значение: они должны быть повторены учителем на классной доске при объяснении физического смысла опыта.

В приложении помещен, как и в первой части книги, список самодельных приборов и приспособлений, которыми следует пополнить оборудование физического кабинета, чтобы обеспечить постановку всех предлагаемых опытов.

Вторую часть пособия написали:

В. А. Буров — § 1 и 4 главы I; § 1, 3 и 5 главы II и главу III;

Б. С. Зворыкин — § 2, 3 и 5 главы I;

А. П. Кузьмин — § 2 (кроме поляризации света) главы II;

И. М. Румянцев — § 4 главы II.

Работа по созданию книги проводилась под общим руководством А. А. Покровского: им подобрана тематика демонстраций, написаны предисловие, введение и опыты по поляризации света в § 2 главы II.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка демонстрационных опытов всегда связана с оборудованием, применяемым в этих опытах, и умением обращаться с ним. Чтобы провести все опыты, описанные в этой книге, надо прежде всего позаботиться о правильном подборе приборов, составляющих это оборудование.

Приборы общего назначения, относящиеся ко всем разделам курса физики (в том числе и к данному тому), описаны во введении к 1-й части настоящего пособия, а многие другие приборы, применяемые в опытах по колебаниям и волнам (осциллограф электронный, секундомер электромеханический и электронный, звуковой генератор и др.) и по оптике (проекционный аппарат, прибор для опытов по геометрической оптике и др.) описаны в брошюрах, прилагаемых к приборам при покупке, и в специальном пособии по оборудованию, входящему в методическую библиотеку школы [1].

Поэтому оказалось возможным не описывать это оборудование перед каждой главой, а ограничиться необходимыми сведениями о некоторых приборах, относящихся к тому или иному отдельному параграфу. Эти сведения помещаются в начале параграфа или при описании опыта с прибором.

Однако по поводу оборудования к главе «Оптика» следует сделать следующие общие замечания. К основным приборам этой главы относятся универсальный проекционный аппарат с оптической скамьей ФОС-67 и прибор для изучения законов оптики. Оба прибора выпускаются промышленностью.

В средней школе к проекционному аппарату необходимо дополнительно приобрести дуговую лампу и осветитель ультрафиолетовый (они продаются отдельно). Кроме того, надо приобрести два набора: набор по дифракции и интерференции света

---

[1] См.: Учебное оборудование по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., 1973.

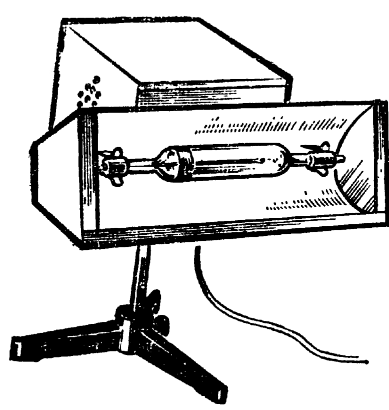


Рис. 1. Осветитель ультрафиолетовый.

и набор по поляризации света. Эти наборы и дуговая лампа подробно описаны в указанной книге по оборудованию.

Что касается осветителя ультрафиолетового, то он подготавливается к промышленному производству и состоит из ртутной лампы ДРТ-220 (мощность ~220 Вт), смонтированной вместе с пусковым устройством (рис. 1). Прибор включается в сеть переменного тока 220 В, при этом лампа потребляет в пусковом режиме ток 5 А, а в установившемся режиме — около 4 А. Нормальное рабочее положение лампы горизонтальное (допускается отклонение не свыше 15°). К осветителю прилагают специальный темный фильтр — увиолевое стекло, пропускающее ультрафиолетовые лучи почти полностью.

В качестве источника ультрафиолетовых лучей можно с успехом применять и малогабаритный переносный осветитель «Ультрасвет», выпускаемый промышленностью для медицинских целей (см. «Физика в школе», 1973, № 2, с. 78).

Универсальный прибор для изучения законов оптики, выпускаемый ранее Главучтехпромом, не был удачным. Он образовался в результате комбинации двух отдельных приборов: оптического диска и прибора, предназначенного для демонстрации хода лучей в оптических инструментах. Источник света в специальном осветителе оказался слишком слабым, а управление световыми пучками с помощью поворачивающихся плоских зеркал — очень ненадежным. Поэтому в школах опыты с универсальным прибором или совсем не проводятся, или демонстрируются лишь частично.

Целесообразно вернуться к прежним двум приборам (они сохранились во многих школах) и показывать опыты, пользуясь в установках осветителем от универсального проекционного аппарата. В этом осветителе применяется весьма удобная кинопроекционная лампа К-18 (300 Вт, 127 В) или К-12 (300 Вт, 110 В).

Большую помощь при подборе оборудования ко всем разделам курса физики могут оказать типовые перечни, опубликованные Министерством просвещения СССР [1].

---

[1] См.: Типовые перечни учебно-наглядных пособий и учебного оборудования для общеобразовательных школ (средняя школа). М., 1977.

В перечни включены изделия всех видов учебно-наглядных пособий и оборудования, которые необходимы для оснащения учебных кабинетов средней школы по разным предметам, в том числе и по физике. Одни из перечисленных изделий серийно выпускаются промышленностью и отвечают школьным требованиям, другие выпускаются промышленностью, но имеют недостатки и подлежат модернизации, третьи требуют разработки и подготовки к серийному производству. Кроме того, в перечни вошли изделия, изготавливаемые промышленностью для нужд народного хозяйства, но признанные полезными для применения в школе.

Все приборы и учебно-наглядные пособия по физике, изготовляемые промышленностью и поступающие в торговую сеть, снабжаются в обязательном порядке инструкциями с описанием устройства и назначения приборов. С их помощью можно получить ясное представление об учебном оборудовании, выпускаемом промышленностью.

Что касается данного пособия, то оно имеет специальное назначение: показать методику и технику применения выпускаемого оборудования в школьном демонстрационном эксперименте.



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§ 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

ОПЫТ 1. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И СИЛЫ УПРУГОСТИ

Оборудование: 1) пружины спиральные — 2 шт., 2) шар деревянный с двумя крючками, 3) штатив универсальный, 4) блок диаметром 25—50 мм в обойме на стержне, 5) нить некрученая, 6) кинофильм «Колебания и волны», ч. I, 7) кинопроектор.

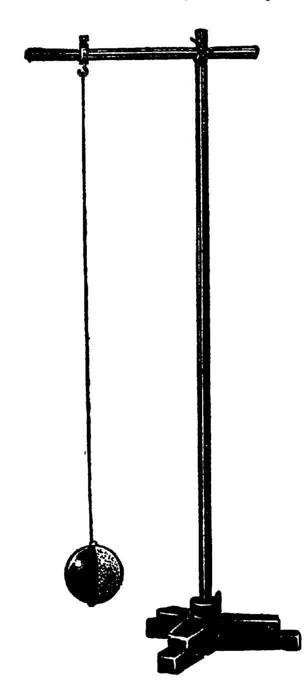


Рис. 1-1. Нитяной маятник.

Для первоначального ознакомления с колебательным движением можно ограничиться демонстрацией колебания тела под действием силы тяжести и силы упругости. В качестве тела удобно взять деревянный шар диаметром 50—70 мм с двумя крючками, у которого одна половина поверхности белая, а вторая — черная.

Вначале показывают простейшую колебательную систему — шарик на нити, подвешенный на Г-образной стойке, собранной из универсального штатива (рис. 1-1). Маятник отводят рукой от положения равновесия и отпускают, наблюдая свободные колебания. Учащимся разъясняют, что в любой колебательной системе свободные колебания поддерживаются только в результате действия внутренних сил и инертности тела.

Наблюдая за колебаниями маятника, устанавливают, что энергия, сообщенная колеблющейся системе, постепенно рассеивается. В результате этого амплитуда постепенно уменьшается и колебания в конце концов прекращаются (затухают).

Опыт показывает, что свободные колебания являются затухающими.

После этого демонстрируют колебания горизонтального пружинного маятника, собрав установку по рисунку 1-2.

Стальные пружины длиной около 100 мм и внешним диаметром 25 мм, навитые из проволоки диаметром 1 мм, зацепляют одним концом за крючки шара, а другим — за винты зажимов, укрепленных на вертикальных стойках П-образной рамы. Последнюю собирают из металлических стержней от универсального штатива. Чтобы исключить действие силы тяжести, в отверстие шара плотно вставляют тонкий стержень, прикрепленный другим концом к обойме блока, надетого на горизонтальный стержень рамы. Шар отводят рукой от положения равновесия и отпускают. Деформированные пружины возвращают шар в положение равновесия, но вследствие инертности он движется дальше и снова растягивает одну и сжимает другую пружины. Только после 10—15 колебаний шар останавливается. Опыт повторяют несколько раз, обращая внимание на то, что в данной системе колебания поддерживаются в результате действия силы упругости и инертности тела. Сила упругости является внутренней силой.

Далее показывают возникновение колебательного движения при одновременном действии на тело двух различных сил: силы тяжести и силы упругости.

Опыт демонстрируют на вертикальном пружинном маятнике. Для увеличения периода колебаний, а следовательно, и выразительности опыта шар подвешивают на двух пружинах, соединенных последовательно (рис. 1-3). В состоянии равновесия на шар действуют две силы: сила тяжести и сила упругости пружины. Эти силы равны по величине, но противоположны по направлению. Следовательно, их равнодействующая равна нулю. При всяком отклонении шара от положения равновесия по вертикали результирующая сила становится отличной от нуля, так как сила тяжести остается постоянной, а сила упругости изменяется пропорционально удлинению пружины.

Чтобы показать это, шар оттягивают немного вниз и обращают внимание учащихся на то, что теперь сила упругости пружи-

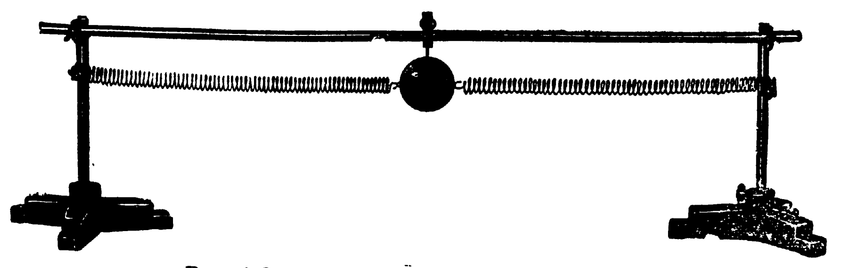


Рис. 1-2. Горизонтальный пружинный маятник.

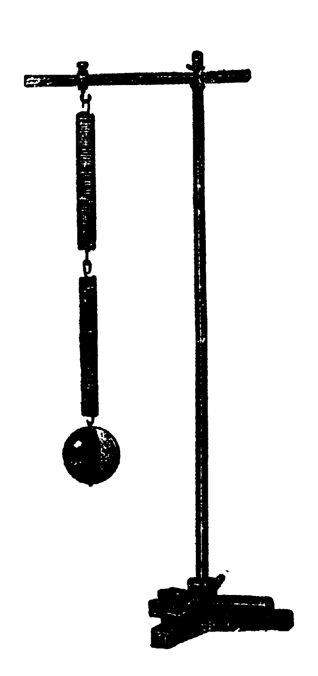


Рис. 1-3. Вертикальный пружинный маятник.

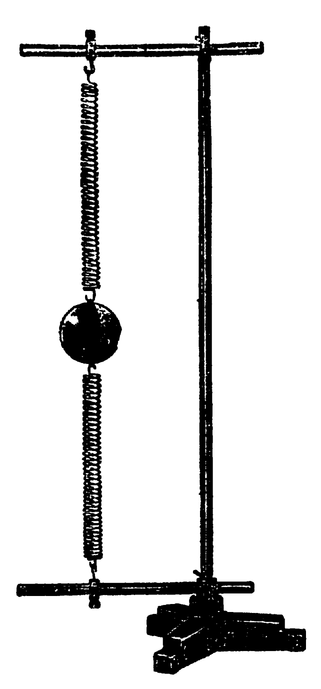


Рис. 1-4. Маятник для демонстрации вертикальных, горизонтальных и крутильных колебаний.

ны стала больше силы тяжести и результирующая сила, равная их разности, направлена вертикально вверх. В этом убеждаются, отпустив шар. Под действием результирующей силы он возвращается в положение равновесия, но по инерции проходит его.

В верхнем положении шар снова останавливают; поясняют, что сила упругости стала меньше силы тяжести и результирующая сила направлена вертикально вниз. Отпустив шар, демонстрируют его свободные колебания.

Наконец, собирают установку по рисунку 1-4 и показывают различные виды свободных колебаний.

Для демонстрации вертикальных колебаний шар оттягивают рукой немного вниз или приподнимают вверх и отпускают. Затем шар оттягивают немного в сторону от положения равновесия и, отпустив, наблюдают горизонтальные колебания. Наконец, шар повертывают на некоторый угол вокруг вертикальной оси и снова отпускают. Возникают крутильные колебания, которые хорошо различаются по мельканию черно-белой поверхности шара. При такой постановке опытов, когда почти без изме-

нения аппаратуры один вид колебания быстро сменяется другим, весьма отчетливо вскрывается характер каждого колебания и различие между ними. Рассмотренные примеры не исчерпывают всех возможных случаев колебательного движения, но и их вполне достаточно для того, чтобы сделать вывод: любые внутренние силы, возвращающие тело в положение равновесия, могут вызвать свободные колебания системы.

В заключение показывают второй фрагмент кинофильма «Колебания и волны»[1]. В этом фрагменте, называемом «Свободные колебания», подробно разбираются причины возникновения колебаний нитяного и пружинного маятников.

Для увеличения наглядности и выразительности описанных выше опытов следует учесть следующее. Во время демонстрации нитяного маятника шар не должен вращаться вокруг собственной оси. Поэтому его подвешивают на некрученой нити или используют бифилярный подвес. Маятники должны колебаться в плоскости, перпендикулярной лучу зрения учащихся. Если колебания маятников наблюдаются на фоне классной доски, то к учащимся должна быть обращена белая сторона шара.

В этом и последующих опытах можно пользоваться пружинами от прибора «Ведерко Архимеда».

ОПЫТ 2. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Оборудование: 1) держатели со спиральными пружинами — 2 шт., 2) гири массой 1 и 2 кг с крючками, 3) штатив универсальный, 4) шкала демонстрационная с нулем посередине, 5) секундомер электромеханический демонстрационный, 6) динамометр демонстрационный.

Для получения достаточно медленных и продолжительных колебаний собирают установку с вертикальным пружинным маятником (рис. 1-5). У верхнего конца стойки штатива на коротком металлическом стержне укрепляют держатель для спиральной пружины, а внизу вертикально зажимают в лапку штатива самодельную шкалу.

Держатель представляет собой жестяной цилиндр, в который свободно входит спиральная пружина[2]. Цилиндр имеет толстое дно, в которое ввернут короткий металлический стержень от универсального штатива, а в открытый конец вставлена по диаметру перемычка из проволоки.

Для крепления пружины ее конец вставляют в держатель и повертывают 2—3 раза, навинчивая на перемычку.

На свободный конец пружины подвешивают гирю 1 кг и укрепляют шкалу так, чтобы ее нулевое деление было располо-

---

[1] Колебания и волны. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1966, 2 ч (8 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 20 мин.

[2] Характеристика пружины указана в предыдущем опыте.

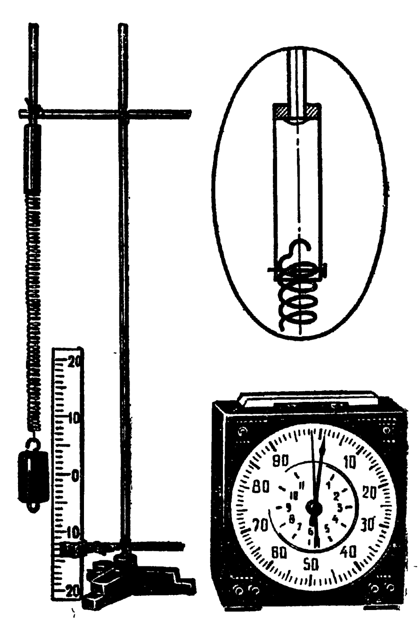


Рис. 1-5. Установка для демонстрации гармонических колебаний; в овале — схема устройства держателя пружины.

жено на одном уровне с серединой неподвижной гири. Рядом с мятником на стол ставят демонстрационный секундомер.

Маятник приводят в колебание вдоль вертикальной линии и, демонстрируя опыт, вводят следующие понятия:

1. Период и частота колебаний. В один из моментов, когда маятник проходит крайнее положение, включают демонстрационный секундомер и измеряют время нескольких полных колебаний. По полученным данным рассчитывают время одного полного колебания, т. е. период. Величину, обратную периоду, называют частотой колебаний.

2. Амплитуда колебаний. Повторяют опыт; когда гиря оказывается в крайнем верхнем или нижнем положении, ее задерживают рукой. Наибольшее отклонение колеблющегося тела от положения равновесия называют амплитудой, а все промежуточные отклонения — смещениями.

Измеряют амплитуду колебаний по демонстрационной шкале. Показывают зависимость величины амплитуды от силы первоначального толчка, который приводит маятник в движение (величины сообщенной телу энергии).

3. Скорость и ускорение при колебаниях. Внимательно наблюдая за медленными колебаниями груза, устанавливают, что колеблющееся тело имеет максимальную скорость в момент прохождения положения равновесия и равную нулю в крайних точках. Можно сообщить учащимся, что ускорение, наоборот, достигает наибольшего значения в крайних точках, когда движение груза изменяется на обратное, и обращается в нуль при прохождении грузом положения равновесия.

4. Фаза колебаний. Продолжая наблюдение за колебаниями маятника, отмечают, что в различные моменты он занимает различные положения относительно положения равновесия. Каждое положение характеризуется определенным смещением и направлением движения. Одно и то же положение, кроме крайних, маятник проходит дважды в течение периода: один раз, двигаясь вверх, а другой — двигаясь вниз. Через каждый период маятник снова возвращается в прежнее положение, а через половину пе-

риода положения отличаются друг от друга лишь направлением движения. В связи с этим сообщают, что смещение колеблющегося тела и направление его движения относительно положения равновесия для любого момента времени характеризуются с помощью особой физической величины, называемой фазой колебания.

Далее переходят к рассмотрению динамической характеристики гармонических колебаний (рис. 1-6).

Вначале из универсального штатива собирают П-образную подставку. Под горизонтальным стержнем на первой стойке с помощью дополнительного стержня укрепляют демонстрационный динамометр, а на второй — свободный винтовой зажим. Гирю массой 2 кг зажимают в жестяной хомутик с малым блоком в обойме и надевают на горизонтальный стержень подставки. Затем натягивают две одинаковые пружины: концы одной из них зацепляют за винт зажима и крючок гири, а второй — за крючок гири и горизонтально расположенный стержень динамометра. Шкалу динамометра поворачивают так, чтобы стрелка оказалась на нуле. Таким образом исключают начальную силу натяжения пружин.

Установку проверяют в действии, устраняя возможные перекосы, и приступают к демонстрации опыта.

5. Изменение силы при колебаниях. Маятник выводят из положения равновесия и отпускают. Одновременно с гирей начинает колебаться и стрелка динамометра (около нулевого деления шкалы), что указывает на непрерывное изменение силы по величине и направлению дважды в течение одного периода.

Из опыта очевидно, что сила, действующая на колеблющееся тело, прямо пропорциональна величине смещения тела и всегда направлена в сторону равновесия. Это служит характеристикой гармонического колебания.

6. Превращение энергии при колебаниях. В установке с горизонтальным маятником удаляют динамометр и свободный конец пружины зацепляют за винт освободившегося зажима. Приводят маятник в колебание и наблюдают периодический переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Поясняют, что

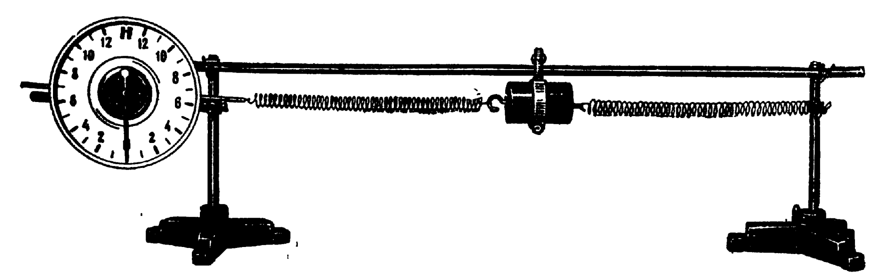


Рис. 1-6. Установка для демонстрации изменения величины и направления возвращающей силы при гармонических колебаниях.

потенциальная энергия в маятнике определяется работой по деформации пружин, а кинетическая энергия связана, главным образом, с массой и скоростью колеблющегося тела.

Минимум потенциальной и максимум кинетической энергии достигается в момент прохождения маятником положения равновесия, а максимум потенциальной и минимум кинетической энергии имеет место в крайних точках. Таким образом, период превращения энергии из одной формы в другую вдвое меньше периода колебания самого маятника.

ОПЫТ 3. СВЯЗЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С РАВНОМЕРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПО ОКРУЖНОСТИ

Оборудование: 1) пружина спиральная с крючками, 2) гиря массой 1 кг с крючком, 3) штатив универсальный, 4) машина центробежная червячная, 5) сирена дисковая с конусной насадкой, 6) стержень металлический 100 мм с винтовым зажимом и шариком из пластилина на конце, 7) осветитель для теневого проецирования и подсвета на стойке, 8) экран проекционный, 9) экран настольный, 10) кинофильм «Колебания и волны», ч. I, 11) кинопроектор.

Изучение гармонических колебаний полезно связать с равномерным движением точки по окружности. Это позволит уточнить понятие о гармоническом колебании, показать, что такое колебание является синусоидальным, а также закрепить трудные понятия о фазе колебания и разности фаз.

На центробежной машине, установленной в треноге от универсального штатива, закрепляют дисковую сирену, а на краю диска в одном из отверстий — металлический стержень с шариком из пластилина. Ось вращения диска располагают горизонтально.

На расстоянии 1—1,5 м от машины ставят осветитель для теневого проецирования, а за машиной — настольный экран (рис. 1-7). Приборы устанавливают так, чтобы на экране полу-

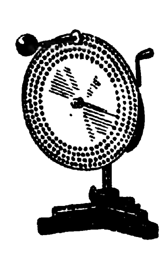
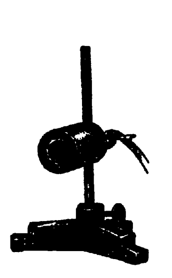




Рис. 1-7. Установка для демонстрации гармонических колебаний тени шарика, равномерно вращающегося по окружности.

Рис. 1-8. Изображение тени от шарика на экране.

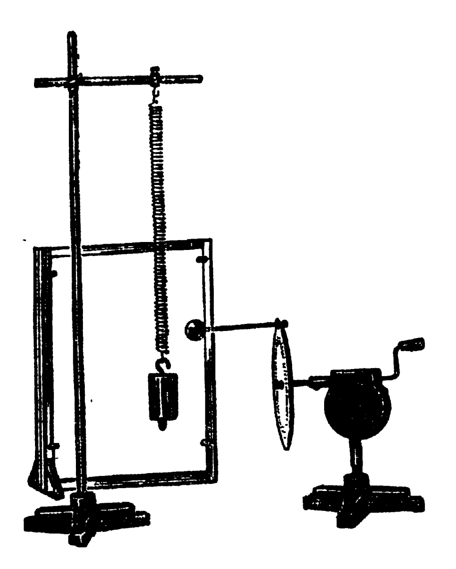


Рис. 1-9. Установка для демонстрации связи гармонических колебаний с равномерным движением по окружности.

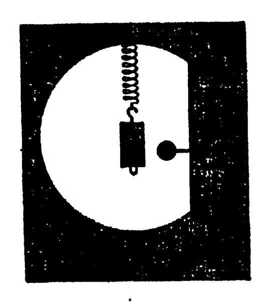


Рис. 1-10. Изображение на экране тени от шарика и гири, подвешенной на пружине.

чилась четкая тень только от шарика и при вращении машины тень колебалась строго по вертикальной линии (рис. 1-8).

Сосредоточив внимание учащихся на экране, приводят шарик в равномерное вращение и наблюдают за движением его тени. В процессе демонстрации опыта выясняют, что за время одного оборота шарика его тень на экране совершает одно полное колебание.

Далее показывают, что тень от шарика совершает гармонические колебания. С этой целью на демонстрационном столе рядом с шариком устанавливают вертикальный пружинный маятник, описанный в предыдущем опыте. Верхний конец маятника закрепляют на такой высоте, чтобы гиря массой 1 кг, подвешенная к нижнему концу пружины, в спокойном состоянии находилась на одном уровне с осью вращения шарика (рис. 1-9).

Маятник приводят в колебание, а шарик — в равномерное вращение с такой скоростью, чтобы обе тени на экране (от шарика и гири) в течение некоторого времени колебались с одинаковыми периодами, амплитудами и фазами (рис. 1-10). Этого можно добиться, если центробежную машину вращать с помощью самодельной проволочной рукоятки, укрепленной вместо крючка с обратной стороны шпинделя. При этом собственная рукоятка машины удаляется, а самодельная располагается так, чтобы ее движение было в одинаковой фазе с вращением шарика.

Во время демонстрации опыта учитель должен внимательно следить не за движущимися телами, а за колебанием их теней на экране. Из опыта делают вывод, что при равномерном вра-

щении точки по окружности ее проекция на один из диаметров совершает гармонические колебания. А так как период колебаний тени от равномерно вращающегося шарика можно сделать достаточно большим, то становится возможным подробно проследить все особенности гармонических колебаний. Например, можно выяснить характер изменения скорости и ускорения.

С этой целью к шарику на стержне, установленному на центробежной машине, прикрепляют небольшую картонную или металлическую стрелку. Шарик поворачивают вокруг стержня до тех пор, пока стрелка расположится по касательной к окружности, которую описывает шарик при своем вращении. В этом случае стрелка характеризует величину и направление скорости шарика, а ее тень — величину и направление скорости тела, совершающего гармоническое колебание.

Шарик приводят в медленное равномерное вращение и наблюдают на экране изменение тени от стрелки. Когда тень от шарика проходит положение равновесия, тень от стрелки достигает наибольшей длины. По мере удаления шарика от среднего положения длина тени от стрелки постепенно убывает. В крайних положениях она обращается в нуль (исчезает за тенью шарика) и изменяет свое направление.

После этого шарик на стержне устанавливают так, чтобы стрелка расположилась вдоль радиуса, а ее острие было направлено к центру диска. Снова приводят шарик в медленное вращение и внимательно наблюдают за движением тени на экране. В этом случае стрелка изображает величину и направление центростремительного ускорения шарика, а ее тень — величину и направление ускорения тела, совершающего гармоническое колебание.

Теперь тень от стрелки достигает максимальной величины в крайних положениях и уменьшается до нуля (скрывается за тенью шарика) по мере приближения к положению равновесия. В момент прохождения положения равновесия стрелка-тень изменяет свое направление на противоположное и благодаря этому остается всегда направленной к положению равновесия.

Наконец, если на диске укрепить два стержня с шариками и проследить за движением их теней на экране, можно уточнить понятие о разности фаз двух колебаний.

В заключение полезно показать техническое применение связи между колебательным и вращательным движениями на примерах движения поршня и махового колеса в модели паровой машины или на движении поршня и коленчатого вала в модели двигателя внутреннего сгорания.

Целесообразно показать третий фрагмент «Связь колебательного и вращательного движений» из первой части кинофильма «Колебания и волны».

ОПЫТ 4. ЗАПИСЬ КОЛЕБАНИЙ

Оборудование: 1) держатель со спиральной пружиной, 2) гиря массой 1 кг с крючком, 3) осциллограф электронный ОЭШ, 4) магнит дугообразный, 5) катушка на напряжение 220 В от универсального трансформатора, 6) штатив универсальный, 7) зажим винтовой, 8) лист фанеры размером 300×500 мм, 9) кисточки для рисования — 2 шт., 10) чернила, 11) бумага белая, 12) кнопки канцелярские, 13) провода соединительные с наконечниками — 2 шт.

В этом опыте рассматривают два способа записи колебаний: механический и электрический.

1. Механическую запись наглядно демонстрируют при помощи вертикального пружинного маятника, совершающего медленные колебания с периодом около 1,2 с. Для этого к нижнему концу пружины, укрепленной на демонстрационном штативе, подвешивают гирю массой 1 кг. К гире прикрепляют горизонтально небольшую кисточку (рис. 1-11).

Пружину поворачивают вокруг вертикальной оси так, чтобы металлический наконечник кисточки слегка прижался к стойке штатива. Это необходимо сделать для устранения крутильных колебаний, которые возникают при вертикальных колебаниях маятника. Кисточку смачивают чернилами и приступают к демонстрации опыта.

К стержню штатива с обратной стороны прижимают лист фанеры, на котором приколота белая бумага. Вначале при неподвижном маятнике фанеру опирают о треногу и перемещают в горизонтальном направлении, следя все время за тем, чтобы кисточка вычерчивала на бумаге прямую линию. Затем фанеру возвращают в исходное положение, а маятник приводят в колебание. На неподвижной бумаге получают вертикальную линию, равную по длине двум первоначальным амплитудам.

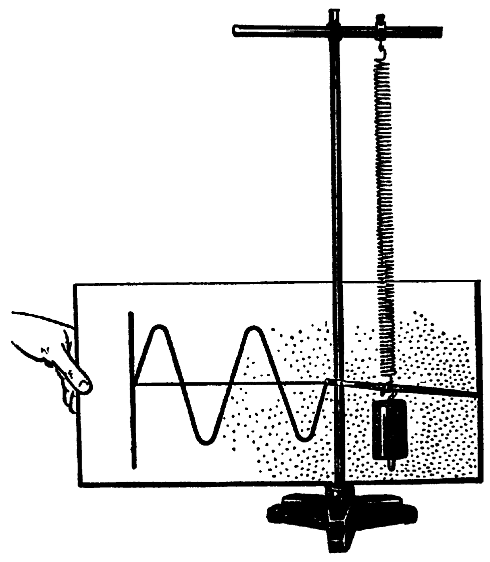
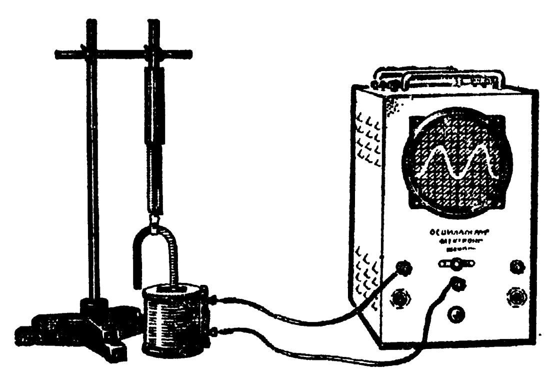


Рис 1-11. Механическая запись колебаний.

После этого маятник снова приводят в колебание, а фанеру по возможности равномерно перемещают по горизонтальному направлению. Получают на бумаге волнистую линию — график колебаний пружинного маятника. Запись можно повторить на отдельных листах бумаги, показав при этом зависи-

Рис. 1-12. Установка для электрической записи колебаний магнита на пружине.



мость вида графика от скорости движения фанеры, от величины амплитуды и частоты колебаний маятника.

2. Для демонстрации электрической записи колебаний собирают установку, как показано на рисунке 1-12. Верхний конец спиральной пружины ввертывают в держатель, укрепленный на горизонтальном стержне подставки, а к нижнему концу прикрепляют небольшой подковообразный магнит. Под магнитом ставят катушку с большим числом витков, взятую, например, от универсального трансформатора (на напряжение 220 В). Зажимы катушки соединяют с входом вертикального усилителя электронного осциллографа.

Осциллограф включают в сеть и, как только появится след луча на экране, выключают генератор горизонтальной развертки; светлое пятно фокусируют и при умеренной яркости устанавливают в центре экрана.

Для первоначального ознакомления учащихся с осциллографом показывают два возможных направления отклонения светлого пятна — по горизонтали и вертикали. Это делают вначале вручную, увеличивая постепенно частоту развертки. Затем светлое пятно устанавливают снова в центре экрана и приступают к демонстрации опыта.

Пружину с магнитом приводят в колебательное движение и наблюдают вертикальные колебания светлого пятна на экране. Замечают, что частота колебаний пятна равна частоте колебаний магнита, а по фазе колебания сдвинуты на четверть периода. Учащимся разъясняют причину этого явления. Амплитуду колебаний пятна подбирают с помощью регулятора вертикального усилителя и делителя входного напряжения.

После этого частоту колебаний магнита увеличивают примерно до 5 Гц, чтобы колебания светлого пятна на экране слились для глаза в сплошную вертикальную линию. Для этого часть витков пружины ввертывают в держатель, чтобы они не участвовали в колебательном процессе. Одновременно с колебаниями пружины создают горизонтальную развертку луча с по-

мощью генератора горизонтальной развертки. В последнем случае ручку ступенчатого переключателя частоты генератора устанавливают на первое деление шкалы и, действуя регулятором плавной настройки, добиваются устойчивого изображения на экране. Если частоту генератора подобрать одинаковой с частотой пружинного маятника, то за время одного полного колебания светлое пятно на экране опишет одну синусоиду.

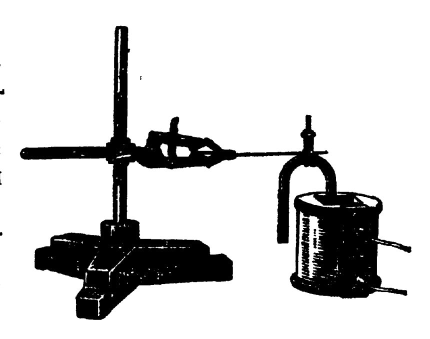


Рис. 1-13 Крепление магнита на стальной пластинке.

В этом опыте вместо спиральной пружины можно взять упругую пластинку, например стальную линейку или полотно от ножовки. Установка опыта для этого случая показана на рисунке 1-13. Пластинку зажимают в лапке штатива, а магнит — с помощью винтового зажима. Демонстрация опыта протекает, как и с пружинным маятником. Для изменения частоты колебаний пластинку переставляют в лапке штатива.

ОПЫТ 5. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ НИТЯНОГО МАЯТНИКА

Оборудование: 1) стержень с тремя маятниками, 2) секундомер электромеханический демонстрационный, 3) весы настольные ВНШО, 4) метр демонстрационный, 5) штатив универсальный, 6) катушка на напряжение 220 В от универсального трансформатора с железным сердечником, 7) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 8) выключатель однополюсный демонстрационный, 9) провода соединительные с наконечниками — 3 шт.

При изучении колебаний нитяного маятника следует показать, что: 1) период колебаний не зависит от массы и амплитуды; 2) период прямо пропорционален квадратному корню из длины маятника; 3) период уменьшается при увеличении ускорения силы тяжести.

Для демонстрации этих опытов удобно воспользоваться простым приспособлением — металлическим стержнем с тремя коническими отверстиями, через которые продеты нити с шариками одинакового размера (железным, алюминиевым и свинцовым). Нити зажимаются в отверстиях деревянными колками (рис. 1-14).

Стержень с маятниками укрепляют в муфте штатива у верхнего конца и, спустив все три шарика до уровня стола, вначале показывают различие в их массе. На одну чашку настольных весов кладут свинцовый шарик, а на другую — остальные два. Как и следует ожидать, свинцовый шарик оказывается тяжелее, так как плотности алюминия, железа и свинца составляют соответственно $2{,}7 \cdot 10^3$ кг/м^3; $7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3; $11{,}4 \cdot 10^3$ кг/м^3.

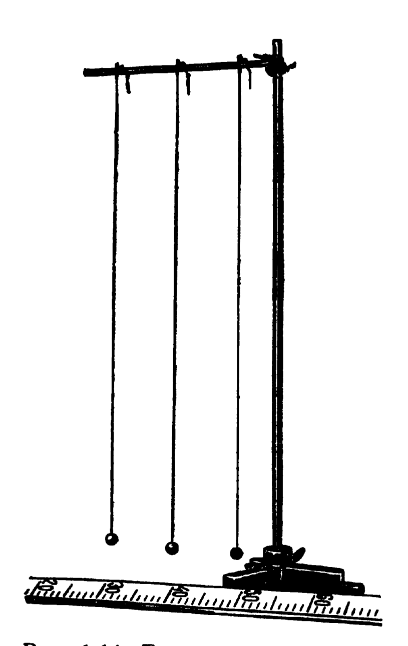


Рис. 1-14. Три маятника на штативе.

1. Железный шарик подтягивают за нить вверх до отказа, а свинцовый и алюминиевый приподнимают над столом так, чтобы они при колебаниях не задевали треноги штатива. При помощи колков тщательно уравнивают длины маятников, так как от этого главным образом зависит успех опыта. Затем оба шарика линейкой отводят в сторону от положения равновесия (на угол не более 5°) и одновременно отпускают. В течение примерно минуты наблюдают одинаковую частоту колебаний шариков и делают вывод о независимости периода колебаний нитяного маятника от его массы.

Изменяют в небольших пределах амплитуду колебаний у одного из маятников. Наблюдают, что маятники качаются синхронно, т. е. при малых углах отклонения период колебаний не зависит от амплитуды.

После этого полезно один из маятников заставить совершать колебания в одной плоскости, а другой — описывать конус так, чтобы шарик двигался по окружности с радиусом, приблизительно равным амплитуде колебания первого шарика. Снова устанавливают совпадение периодов колебаний обоих маятников. Это наблюдение может быть использовано для вывода формулы периода колебаний маятника.

2. На нити оставляют один свинцовый шарик, а железный и алюминиевый поднимают вверх до отказа. Освободившиеся концы нитей спускают вдоль стойки штатива, чтобы они не мешали демонстрации опыта. Нить, на которой висит свинцовый шарик, освобождают от крепления, а конец ее придерживают рукой.

Сообщают маятнику колебательное движение и, когда он проходит положение равновесия, немного подтягивают нить. Частота колебаний маятника заметно увеличивается. После 3—4 полных колебаний снова уменьшают длину маятника; частота колебаний становится еще больше. Не дожидаясь затухания колебаний, нить опускают до первоначальной длины и наблюдают восстановление прежней частоты. Приходят к выводу, что период колебания зависит от длины маятника.

Для установления количественных соотношений штатив с маятником устанавливают на краю стола. Свинцовый шарик опускают ниже крышки стола, чтобы длина маятника от точки под-

веса до центра шарика была равна 100 см[1]. Длину маятника измеряют с помощью демонстрационного метра.

Маятник отводят немного в сторону и отпускают. В момент, когда он проходит крайнее положение, включают демонстрационный секундомер и измеряют время десяти полных колебаний, отсчитывая их вслух. Оказывается, что это время равно 20 с; следовательно, период колебаний — 2 с.

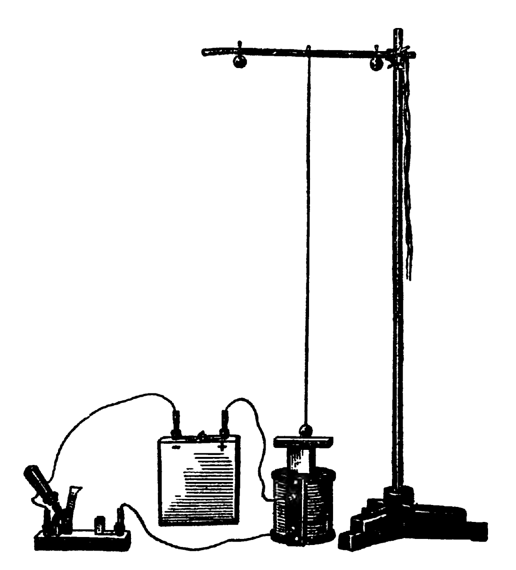


Рис. 1-15. Колебание железного шарика в магнитном поле.

Опыт повторяют, уменьшив длину маятника до 25 см, т. е. в четыре раза, и убеждаются, что период колебаний стал равен одной секунде, т. е. уменьшился в два раза. Из результатов проведенного опыта делают вывод: период колебаний маятника прямо пропорционален корню квадратному из его длины.

3. Чтобы показать зависимость периода колебаний от ускорения силы тяжести, надо иметь возможность изменять это ускорение. Для этого можно воспользоваться железным шариком и поместить под ним электромагнит (рис. 1-15).

Как видно из рисунка, алюминиевый и свинцовый шарики подтянуты вверх. Железный шарик спущен и висит над сердечником электромагнита, собранного из катушки на напряжение 220 В и сердечника от универсального трансформатора. Обмотка электромагнита соединена через выключатель с батареей аккумуляторов напряжением около 4 В.

Подбирают длину маятника такой величины, чтобы шарик в положении равновесия отстоял от сердечника электромагнита на расстоянии 3—5 мм и не прикасался к нему при включении тока. Затем сообщают маятнику колебательное движение с малой амплитудой при разомкнутой цепи электромагнита. После нескольких колебаний включают ток в момент, когда шарик проходит положение равновесия. Частота колебаний резко увеличивается. Не дожидаясь остановки маятника, выключают ток и наблюдают восстановление периода. Опыт повторяют и убеждаются, что всякий раз при наличии магнитного поля частота колебаний маятника возрастает.

[1] На нити заранее должны быть сделаны чернилами метки, чтобы быстро получить маятники длиной 100 и 25 см.

ОПЫТ 6. ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Оборудование: 1) держатель со спиральной пружиной, 2) гири массой 250 г и 1 кг, 3) секундомер электромеханический демонстрационный, 4) штатив универсальный, 5) метр демонстрационный.

При изучении колебаний пружинного маятника следует показать, что: 1) период колебаний не зависит от амплитуды; 2) период прямо пропорционален квадратному корню из массы колеблющегося тела; 3) период обратно пропорционален квадратному корню из коэффициента упругости пружины.

Для демонстрации этих опытов собирают установку по рисунку 1-16. Стойку штатива составляют из двух свинчивающихся стержней — длинного и короткого. Спиральную пружину ввертывают на 2—3 витка в держатель, укрепленный на штативе, и нагружают гирей массой 1 кг. Рядом на столе располагают демонстрационный секундомер и приступают к демонстрации опытов.

1. Маятник приводят в вертикальное колебание с амплитудой 4—5 см. В один из моментов времени, когда гиря проходит самое нижнее положение, включают демонстрационный секундомер и измеряют время десяти полных колебаний, отсчитывая их вслух. В нашем опыте это время оказывается равным 12,6 с. Следовательно, период колебаний равен 1,26 с.

Через некоторое время, когда амплитуда колебаний маятника заметно уменьшится, опыт повторяют. Из сопоставления результатов измерений делают вывод о независимости периода колебаний пружинного маятника от величины амплитуды.

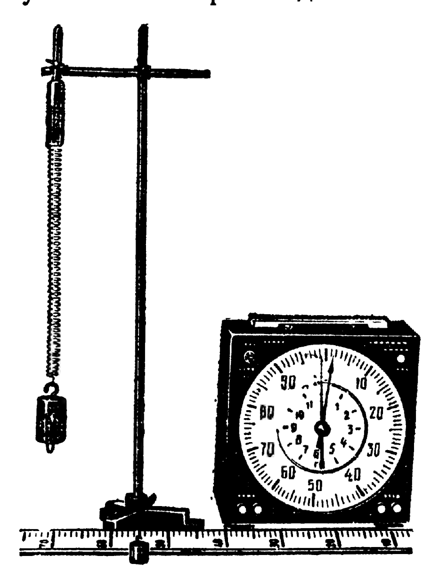


Рис. 1-16. Демонстрация колебаний пружинного маятника.

2. К пружине подвешивают гирю массой 250 г и снова определяют период колебаний. Он оказывается равным 0,6 с, т. е. в 2 раза меньше, чем в предыдущем опыте. На основании этого можно сделать вывод: период упругих колебаний маятника прямо пропорционален квадратному корню из массы колеблющегося тела (масса пружины не учитывается).

3. У пружины оставляют одну четвертую часть работающих витков, а остальные ввертывают в держатель. К нижнему концу подвешивают гирю массой 1 кг и снова определяют период колебаний. Он оказывается равным примерно 0,6 с.

Сравнивая полученный результат с периодом колебаний полной пружины, определенным в первом опыте, приходят к заключению, что период колебаний пружинного маятника прямо пропорционален квадратному корню из числа витков пружины. Последний вывод можно сформулировать иначе: период колебаний пружинного маятника обратно пропорционален квадратному корню из коэффициента упругости пружины, под которым понимается сила, необходимая для растяжения пружины на 1 м.

Для определения коэффициентов упругости пружины в первом и третьем случаях измеряют с помощью демонстрационного метра абсолютные удлинения пружины при действии силы в 10 Н. Коэффициент упругости полной пружины оказывается равным примерно 28 Н/м, а четвертой части — 110 Н/м, т. е. коэффициенты упругости обратно пропорциональны числу витков пружины.

Установленные закономерности можно представить так:

$$T \approx \sqrt{\frac{m}{k}},$$

где T — период, m — масса колеблющегося тела, k — коэффициент упругости пружины.

Если ввести коэффициент пропорциональности, то можно записать уравнение:

$$T = K\sqrt{\frac{m}{k}},$$

тогда

$$K = T\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Подставляя в последнюю формулу числовые значения величин, найденных в результате измерения, получаем:

$$K = 1{,}26\ \text{с}\sqrt{\frac{28\,\frac{\text{Н}}{\text{м}}}{1\ \text{кг}}} = 1{,}26\ \text{с}\sqrt{\frac{28\,\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{м}\cdot\text{с}^2}}{1\ \text{кг}}} \approx 6{,}33.$$

Эта величина приблизительно равна 2π. Поэтому формулу для периода колебания маятника окончательно записывают так:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

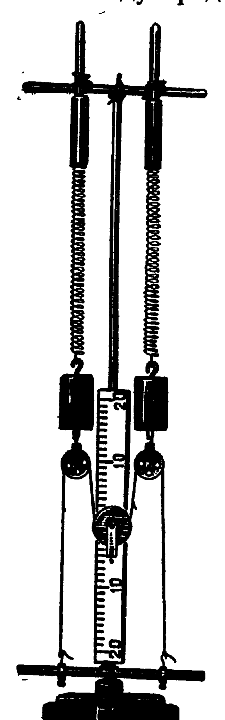
ОПЫТ 7. СЛОЖЕНИЕ ДВУХ КОЛЕБАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ ПО ОДНОЙ ПРЯМОЙ

Оборудование: 1) держатели со спиральной пружиной — 2 шт., 2) гири массой 1 кг с крючками — 2 шт., 3) блоки диаметром 5—7 см в обойме с одним крючком — 3 шт., 4) осциллограф электронный ОЭШ, 5) катушка от универсального трансформатора на напряжение 220 В, 6) магниты дуго-

образные — 2 шт., 7) штатив универсальный, 8) шкала демонстрационная с нулем посередине и резиновыми кольцами для крепления, 9) провода соединительные с наконечниками — 2 шт., 10) нить некрученая длиной 1,5—2 м, 11) кинофильм «Колебания и волны», ч. I, 12) кинопроектор.

На демонстрационном штативе подвешивают два вертикальных пружинных маятника, как показано на рисунке 1-17. Стойку штатива составляют из двух длинных свинчивающихся стержней. К верхнему горизонтальному стержню с помощью муфт прикрепляют держатели со спиральными пружинами. К нижнему концу каждой пружины подвешивают гирю 1 кг с двумя крючками, а к гирям — блоки в обойме с одним крючком. Оба блока с помощью прочной нити соединяют с подвижным блоком. Концы нити привязывают к крючкам муфт, надетых на нижний горизонтальный стержень.

Положение муфт регулируют так, чтобы отрезки нитей, соединяющим блоки, были расположены вертикально, а расстояние между средним и верхним блоками составляло примерно 10 см. Чтобы уменьшить затухание колебаний маятников, блоки берут по возможности легкими (особенно средний) и с малым трением в осях. Демонстрационную шкалу прикрепляют к стойке штатива двумя резиновыми кольцами так, чтобы нулевое деление ее оказалось на одном уровне с осью подвижного блока.


Рис. 1-17. Установка для демонстрации сложения двух колебаний, направленных по одной прямой.

На собранной установке демонстрируют: 1) сложение колебаний одинаковой частоты, 2) сложение колебаний с близкими частотами, 3) сложение колебаний с кратными частотами.

1. Вначале маятники тщательно настраивают на одинаковую частоту колебаний с помощью держателей пружин, вращая их вокруг вертикальной оси. Это изменяет число работающих витков пружины и тем самым частоту колебаний маятника. Затем приступают к демонстрации опыта.

Медленно поднимают и опускают рукой одну гирю, оставляя вторую неподвижной. Учащиеся убеждаются, что средний блок повторяет движение гири. То же проделывают со второй гирей, а первую оставляют неподвижной. Затем руками поднимают и опускают обе гири одновременно. При этом средний блок перемещается на удвоенное расстояние, осуществляя сложение движений двух гирь. Перемещение блоков отсчитывают по демонстрационной шкале.

Далее обе гири заставляют свободно колебаться в одинаковой фазе. Из наблюдений за

движением среднего блока делают вывод: при сложении двух колебаний одинакового направления, имеющих одинаковые частоты и фазы, получается результирующее колебание с той же частотой, но амплитудой, равной сумме амплитуд слагаемых колебаний.

После этого маятники снова приводят в колебание с одинаковыми начальными амплитудами, но в противоположных фазах. Теперь средний блок, осуществляя алгебраическое сложение двух колебаний, остается неподвижным, показывая тем самым, что амплитуда результирующего колебания равна нулю, т. е. одно колебание полностью гасит другое. Если начальные амплитуды маятников различны, то результирующее колебание среднего блока происходит с той же частотой, что и составляющие, но с амплитудой, равной разности амплитуд слагаемых колебаний.

Наконец, маятники пускают с одинаковыми начальными амплитудами, но с разностью фаз, равной одной четверти периода. Для этого вторую гирю отпускают в тот момент, когда первая проходит положение равновесия. Амплитуда колебания среднего блока оказывается меньше, чем в первом, но больше, чем во втором случае.

Гармонические колебания одинаковой частоты и направления, разность фаз которых длительно сохраняется постоянной, называют когерентными колебаниями, а явление сложения когерентных колебаний — интерференцией колебаний.

2. Изменяют немного частоту колебаний у одного маятника и снова продолжают опыты. Маятники пускают с одинаковыми амплитудами и фазами. Продолжают наблюдение за движением среднего блока. Когда частоты слагаемых колебаний мало различаются, то в некоторые промежутки времени колебания обоих маятников почти совпадают по фазе. В это время они, усиливая друг друга, заставляют средний блок колебаться с наибольшей амплитудой. Но через некоторое время колебания маятников оказываются в противоположных фазах, и тогда амплитуда результирующего колебания становится равной нулю. Это явление повторяется, т. е. наблюдаются биения.

Чтобы показать зависимость частоты биений от разности частот слагаемых колебаний, маятники расстраивают еще больше. Частота биений среднего блока увеличивается.

В этих опытах начальные частоты выбирают так, чтобы можно было наблюдать несколько биений, прежде чем маятники прекратят свои колебания.

3. Увеличивают частоту колебаний у одного маятника в два раза. Для этого у пружины оставляют примерно одну четвертую часть работающих витков, а остальные ввертывают в держатель. После этого держатель с укороченной пружиной опускают в муфте так, чтобы нижние концы обеих пружин снова оказались на одном уровне.

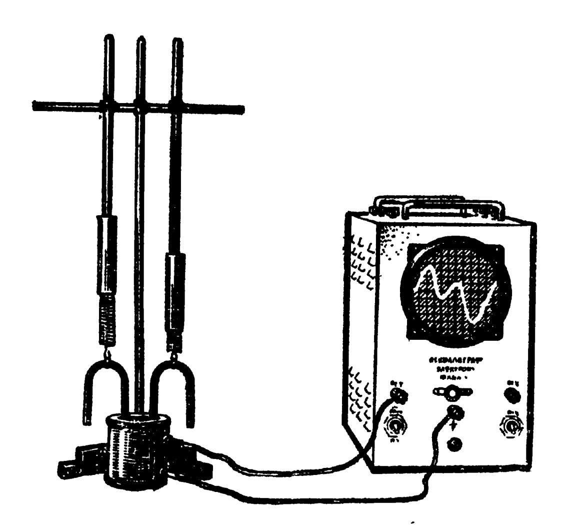


Рис. 1-18. Демонстрация сложения двух колебаний, направленных по одной прямой, с помощью осциллографа.

Маятники приводят в колебательное движение с одинаковыми начальными амплитудами, но с разными фазами. Теперь средний блок совершает результирующее негармоническое колебание, форма которого, как показывает опыт, изменяется в зависимости от начальной разности фаз слагаемых колебаний.

Полезно обратить внимание учащихся на обратную сторону этого явления — разложение результирующего колебания на его составляющие. Сложное периодическое колебание среднего блока раскладывается на простые гармонические колебания с частотами, кратными основной частоте сложного колебания. В этом случае составляющие колебания называют гармониками или обертонами, а сам процесс разложения — гармоническим анализом.

Опыты с пружинными маятниками полезно продолжить, чтобы показать еще электрический способ сложения колебаний. Для этого несколько меняют установку (рис. 1-18). К нижним концам пружин вместо гирь с блоками подвешивают небольшие дугообразные магниты, а под ними располагают катушку на напряжение 220 В от универсального трансформатора. Высоту пружин и расстояние между ними регулируют так, чтобы оба магнита свободно входили одноименными полюсами внутрь катушки и при колебаниях не мешали друг другу. Катушку соединяют со входом вертикального усилителя осциллографа, включенного в сеть на соответствующее напряжение.

Вначале оба маятника настраивают на одну и ту же частоту колебаний, а светлое пятно устанавливают в центре экрана осциллографа. Затем приводят в колебание первый маятник.

Вследствие движения магнита в катушке возникает переменная электродвижущая сила, которая растягивает светлое пятно на экране в вертикальную полоску. Рекомендуется это растяже-

ние довести до $^1/_3$ диаметра экрана, используя для этого усилитель электронного осциллографа. Колебания светлого пятна соответствуют теперь колебаниям подвижного блока при механическом сложении колебаний.

Останавливают первый маятник и приводят в колебание второй с той же амплитудой. Смещение пятна на экране оказывается таким же, как и при колебаниях первого маятника.

Далее приводят в колебание оба маятника и наблюдают одновременное воздействие двух электродвижущих сил одной частоты на электронный пучок при разности фаз, равной 0, 180 и 90°.

После этого переходят к демонстрации сложения колебаний, незначительно отличающихся друг от друга по частоте. В этом случае на экране получают характерную картину биений.

В заключение показывают сложение колебаний с кратными частотами.

Электрический способ фиксации колебаний выгодно отличается от механического, подробно рассмотренного выше, тем, что позволяет демонстрировать еще графически сложение двух колебательных движений. Для этого необходимо включить генератор горизонтальной развертки с частотой 2—5 Гц. Рекомендуется показать отдельно график колебания первого маятника, затем второго и, наконец, демонстрировать график результирующего колебания для всех рассмотренных выше случаев.

Для закрепления изучаемого материала показывают четвертый фрагмент «График гармонического колебания» из учебного кинофильма «Колебания и волны».

ОПЫТ 8. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

Оборудование: 1) пружины спиральные с крючками — 2 шт., 2) шар деревянный с двумя крючками и съемным демпфером, 3) машина центробежная червячная с эксцентриком и конусной насадкой, 4) блок диаметром 25—50 мм в обойме на стержне, 5) штатив универсальный, 6) нить капроновая, 7) кружок картонный — индикатор.

Для демонстрации вынужденных колебаний собирают установку с горизонтальным пружинным маятником (рис. 1-19). За крючки деревянного шара диаметром 50—70 мм зацепляют две одинаковые спиральные пружины. В отверстие шара ввинчивают стержень с блоком. Последний надевают на горизонтальный (удлиненный) стержень П-образной подставки, собранной из универсального штатива. Один конец пружины зацепляют за винтовой зажим, а второй привязывают к капроновой нити длиной 40—50 см. На нити укрепляют картонный круг — индикатор, диаметром 50—70 мм. Для этого нить продевают в два отверстия круга, расположенных симметрично его центра. Конец нити с помощью петельки зацепляют за эксцентрик из набора принадлежностей к универсальному электродвигателю. Эксцентрик

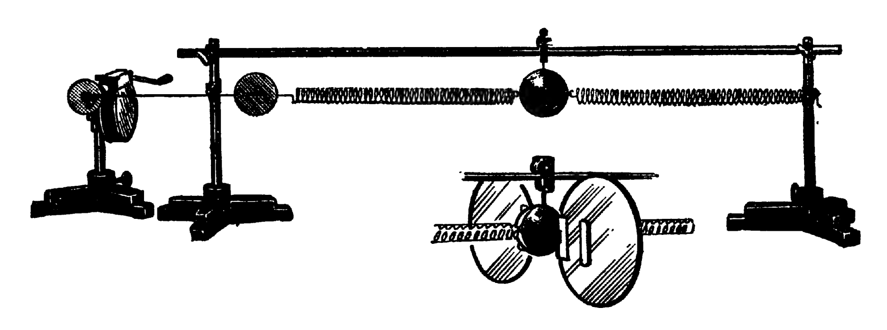


Рис. 1-19. Установка для демонстрации вынужденных колебаний и резонанса; внизу — шар с демпфером.

укрепляют на центробежной машине с помощью конусной насадки. Для вращения машины применяют самодельную ручку. Ее ввертывают с обратной стороны шпинделя вместо крючка. Натягивают пружины перемещением центробежной машины и устраняют возможные перекосы.

Вначале показывают свободные колебания. Для этого шар отводят от положения равновесия и отпускают. Маятник, предоставленный самому себе, начинает совершать затухающие колебания с частотой, зависящей от свойств самой колебательной системы: массы колеблющегося шара, упругости пружины и силы сопротивления.

Когда шар остановится, демонстрируют вынужденные колебания. Машину приводят в равномерное вращение с частотой, меньшей частоты собственных колебаний маятника. На маятник через нить начинает действовать внешняя периодическая сила.

Вынужденные колебания устанавливаются не сразу. Вначале маятник совершает довольно сложные колебания, так как к вынужденным колебаниям примешиваются еще и собственные колебания, возбужденные в начальный момент действия силы. Но через некоторое время, называемое периодом установления режима, свободные колебания затухают и остаются только вынужденные.

Внимание учащихся сосредоточивают на движении шара и картонного круга — индикатора, характеризующего действующую силу. Приходят к заключению, что частота вынужденных колебаний равна частоте изменения действующей силы; амплитуды обоих колебаний почти одинаковы.

Постепенно увеличивают скорость вращения машины и наблюдают возрастание амплитуды вынужденных колебаний.

Когда частота внешней силы окажется близкой к собственной частоте колебаний маятника, амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. Это явление называют резонансом. При дальнейшем увеличении скорости вращения амплитуда вынужденных колебаний уменьшается (через некоторое время стано-

вится меньше амплитуды силы), но частота по-прежнему совпадает с частотой действующей силы. Об этом судят, сравнивая колебания шара и индикатора на нити.

Затем скорость вращения машины постепенно уменьшают до первоначальной величины. Все явления повторяются в обратном порядке.

Проделанный опыт позволяет сделать следующие выводы: 1) в колебательной системе, на которую действует периодически изменяющаяся сила, устанавливаются вынужденные колебания, 2) частота вынужденных колебаний равна частоте действующей силы, 3) амплитуда вынужденных колебаний достигает наибольшего числового значения, когда частота вынуждающей силы почти равна частоте собственных колебаний системы.

Далее переходят к выяснению зависимости фазы вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы. Описанный опыт с маятником повторяют. При медленном вращении машины шар и индикатор колеблются согласованно: они одновременно проходят положение равновесия, одновременно достигают крайних положений и все время имеют одинаковые направления движения, т. е. фазы их совпадают.

Увеличивая частоту колебаний силы, замечают, что вынужденные колебания начинают отставать по фазе от вынуждающей силы. В момент резонанса разность фаз достигает 90°.

Когда частота внешней силы становится больше частоты собственных колебаний, шар и индикатор колеблются в противоположные стороны, указывая, что разность фаз достигла 180°.

После этого нетрудно объяснить, что только при разности фаз в 90° направление вынуждающей силы в течение всего периода совпадает с направлением движения колеблющегося тела. При этом внешняя сила все время подталкивает колеблющееся тело, совершая положительную работу. Во всех остальных случаях сила то ускоряет, то тормозит движение тела. В результате полная работа близка к нулю.

При резонансе от источника (вибратора) к приемнику (резонатору) передается наибольшее количество энергии. За счет этой энергии происходит увеличение амплитуды колебаний. Но с увеличением амплитуды возрастают потери энергии на преодоление сопротивления среды и потому амплитуда автоматически принимает такое значение, при котором прибыль энергии компенсируется расходом на трение и излучение в окружающую среду.

Чтобы выяснить влияние трения на резонанс, маятник демпфируют двумя картонными кружками, которые вставляют с помощью держателей в боковые отверстия шара (см. рис. 1-19). Повторяют опыт и убеждаются, что при наличии значительного трения процесс установления вынужденных колебаний происходит быстрее, а резонансная амплитуда лишь немного превышает амплитуду колебаний действующей силы. Другими словами, при

наличии значительного затухания колеблющееся тело теряет всю получаемую им энергию уже при небольших амплитудах и потому явление резонанса выражено слабо.

ОПЫТ 9. РЕЗОНАНС МАЯТНИКОВ

Оборудование: 1) грузы массой 50 г с крючками — 3 шт. и 100 г — 1 шт., 2) штатив универсальный, 3) струбцинки — 2 шт, 4) нить прочная, 5) метр демонстрационный.

Собирают установку по рисунку 1-20, треноги закрепляют на столе струбцинками. Опыт проводят в такой последовательности.

Нить берут рукой за середину и приводят в колебание с небольшой амплитудой. Частоту колебаний подбирают одинаковую с частотой собственных колебаний одного из маятников. Амплитуда колебаний выбранного маятника начинает постепенно увеличиваться в то время, как остальные маятники только слегка покачиваются.

Изменяя частоту колебаний нити, проделывают описанный опыт поочередно с каждым из маятников и разъясняют сущность явления.

Все маятники останавливают, а маятник *1* приводят в колебание (он выполняет роль вибратора) и наблюдают за поведением остальных маятников. Замечают, что сильнее всего раскачивается маятник *4*, имеющий с вибратором одинаковую частоту.

Длину маятника *1* уменьшают до 75 см и снова повторяют опыт. Теперь резонирует маятник *3*. Наконец, длину маятника *1* уменьшают до 50 см и демонстрируют резонанс маятника *2*.

Маятниками *2*, *3* и *4* пользуются как вибраторами, а маятник *1* применяют в качестве резонатора.

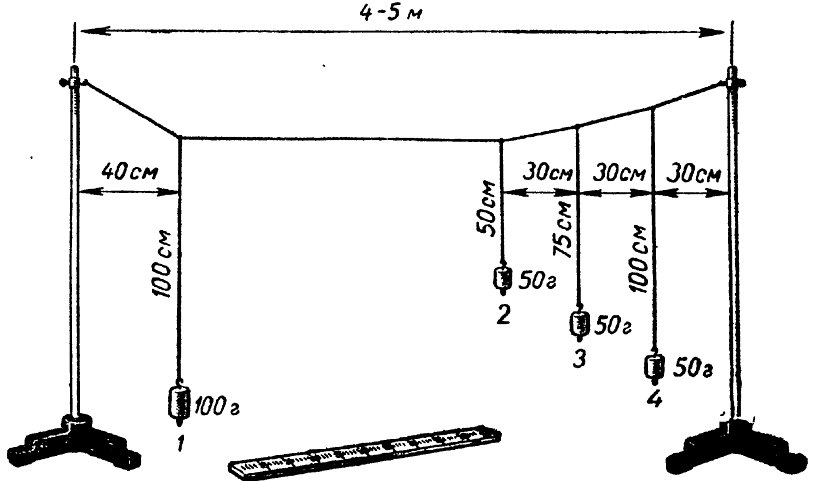


Рис. 1-20. Установка для демонстрации резонанса маятников.

Изменяя постепенно длину маятника *1*, добиваются явления резонанса для каждого маятника, т. е. демонстрируют поочередную настройку резонатора на частоту вибраторов.

Следует обратить внимание учащихся на разность фаз между колебаниями вибратора и резонатора. В момент резонанса она равна 90°, что очень хорошо наблюдается на опыте вследствие медленных колебаний маятников.

В постановке описанных опытов большое значение имеет величина связи между маятниками. Нить между ними должна быть натянута очень слабо, чтобы энергия от вибратора поступала только в одном направлении — к резонатору. При сильной связи происходит обмен энергией между маятниками и явление резонанса осложняется биениями.

ОПЫТ 10. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РЕЗОНАНСНОГО ТАХОМЕТРА

Оборудование: 1) модель тахометра резонансного, 2) машина центробежная червячная на треноге с эксцентриком и конусной насадкой, 3) прокладка резиновая, 4) кинофильм «Резонанс», 5) кинопроектор.

Модель резонансного тахометра представляет собой железную скобку, с одной стороны которой имеется зажимный винт, а с другой прикреплены между двумя брусочками четыре упругие пластинки различной длины (рис. 1-21). На концах пластинок имеются жестяные прямоугольники — флажки, покрытые белой краской. Пластинки могут совершать упругие колебания, причем собственная частота пластинок различна.

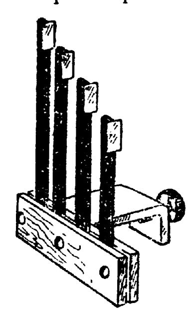


Рис. 1-21. Модель резонансного тахометра.

Для демонстрации прибор укрепляют на центробежной машине, установленной в треноге от универсального штатива (рис. 1-22). На шпинделе машины закрепляют эксцентрик, взятый из набора принадлежностей к универсальному электродвигателю. Вместо эксцентрика можно взять подходящих размеров гайку и укрепить ее сбоку шпинделя под зажимный винт. Под основание машины подкладывают резиновую прокладку.

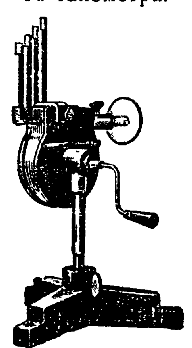


Рис. 1-22. Центробежная машина с моделью резонансного тахометра.

Повертывают флажки в сторону учащихся и, придерживая машину рукой, плавно вращают рукоятку, медленно и равномерно увеличивая скорость. В это время пластинки прибора испытывают периодические толчки, частота которых равна числу оборотов машины. Когда частота вынужденных колебаний совпадет с собственной частотой одной из пластинок, амплитуда колебаний последней сильно увеличится и ее белый флажок растянется в светлую полоску. При постепенном увеличении скорости вращения пла-

стинки вступают в резонанс поочередно, начиная с самой длинной. После наблюдения резонанса на последней (короткой) пластинке скорость машины еще немного увеличивают; затем, отпустив рукоятку, предоставляют машине вращаться по инерции. По мере уменьшения скорости вращения машины колебания пластинок повторяются в обратном порядке.

Если известна собственная частота колебаний пластинок, то с помощью такого прибора можно было бы определить скорость вращения машины.

Учащимся сообщают, что на этом принципе основано действие язычкового частотомера, которым измеряют частоту переменного тока. Устройство и принцип действия этого прибора подробно раскрывается в учебном кинофильме «Резонанс»[1]. Из этого фильма учащимся демонстрируют первую часть, в которой рассматривается явление резонанса на опытах с пружинным маятником и приводятся примеры технических применений.

ОПЫТ 11. РЕЗОНАНС ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Оборудование: 1) электродвигатель на треноге с эксцентриком и резонирующей пластинкой, 2) реостат сопротивлением 600 Ом или регулятор напряжения РНШ, 3) кинофильм «Резонанс», 4) кинопроектор.

В осветительную сеть включают через реостат или автотрансформатор электродвигатель переменного тока. К корпусу двигателя привинчивают металлическую насадку, на которой между двух брусочков укреплена упругая пластинка — резонатор (рис. 1-23). Якорь электродвигателя никогда не бывает центрирован идеально. Поэтому при вращении якоря возникают вибрации с частотой, равной частоте вращения. Эти вибрации передаются корпусу двигателя и столу.

При медленном увеличении скорости вращения двигателя частота вынужденных колебаний в некоторый момент совпадает с частотой собственных колебаний пластинки. В это время наступает резонанс, который хорошо наблюдается по интенсивному колебанию пластинки.

Затем скорость вращения немного увеличивают и оставляют постоянной, а медленно изменяют длину пластинки-резонатора, пе-

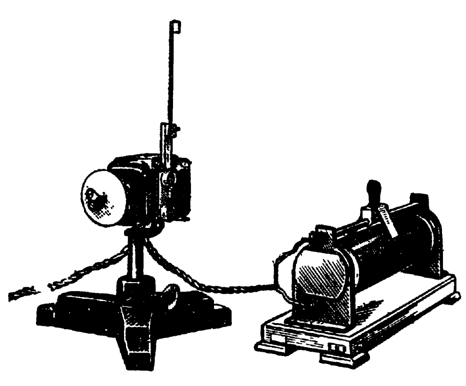


Рис. 1-23. Установка с электродвигателем для демонстрации резонанса.

[1] Резонанс. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1968, 2 ч. Продолжительность демонстрации — 10 мин.

ремещая ее за нижний конец в держателе. При этом снова возникает явление резонанса.

Подобная настройка резонатора на частоту вибратора может служить механической аналогией процесса настройки приемного колебательного контура на данную радиостанцию.

При дальнейшем увеличении числа оборотов двигателя легко подстроиться в резонанс с собственными колебаниями стола. При этом слышен громкий звук (дребезжание крышки стола) и электродвигатель начинает «ползти» по столу.

Еще увеличивают скорость двигателя и обращают внимание на то, что он опять начинает работать спокойно.

Если двигатель не дает достаточной вибрации и резонанс наблюдается слабо, то на ось двигателя насаживают эксцентрик.

Учащимся сообщают, что с возможностью возникновения опасных вибраций при резонансе приходится считаться при конструировании, постройке и установке различных машин и сооружений. В связи с этим показывают фрагменты из учебного кинофильма «Резонанс». Разрушительное действие резонанса раскрывается во второй части фильма.

При демонстрации этого опыта следует строго соблюдать правила техники безопасности. Для этого необходимо надежно укрепить эксцентрик на валу электродвигателя и во время демонстрации опыта не превышать пределы допустимых скоростей вращения электродвигателя. Его следует размещать на столе таким образом, чтобы исключить всякую возможность попадания отлетевших деталей в учащихся.

ОПЫТ 12. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Оборудование: 1) маятник в часах на подставке, 2) держатель со спиральной пружиной, 3) гиря массой 1 кг с крючком, 4) катушка на напряжение 220 В от универсального трансформатора с железным сердечником, 5) реостат сопротивлением 200 Ом, 6) лампа электрическая на напряжение 127 В, 100 Вт, 7) фотореле на панели, 8) сосуд с сифоном, 9) штатив универсальный, 10) линейка металлическая 500 мм, 11) провода соединительные с наконечниками — 5 шт.

Автоколебания могут быть получены в самых разнообразных колебательных системах — механических, электрических, электромеханических и др.

1. Механические автоколебания демонстрируют на модели часов (рис. 1-24).

Вначале показывают основные части механической автоколебательной системы: собственно колебательную систему (маятник), источник энергии, поддерживающий незатухающие колебания (гирю), и приспособление, регулирующее поступление энергии в колебательную систему (храповое колесо с анкерной вилкой). Затем заводят часы и показывают, что при любом начальном отклонении маятника амплитуда его колебаний через некоторое время достигает определенной величины и после этого

2 Зак 1357

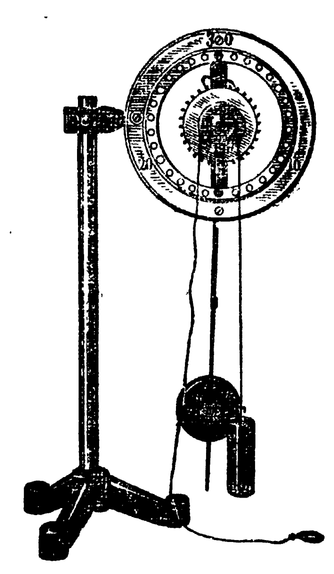


Рис. 1-24. Прибор ««Маятник в часах» на стойке.

остается постоянной. Величина амплитуды определяется, с одной стороны, величиной энергии, поступающей от источника (гири), а с другой — расходом ее на преодоление различных сил сопротивления.

При установившихся колебаниях количество энергии, расходуемой маятником за один период, равно количеству энергии, поступающей за это же время от источника. Такие стационарные незатухающие колебания, поддерживаемые в системе за счет энергии постоянного источника, называют автоколебаниями.

Далее изменяют частоту колебаний маятника, перемещая груз на стержне. При этом устанавливают, что частота автоколебаний не зависит от внешних условий, как это наблюдается в случае вынужденных колебаний; она определяется приведенной длиной маятника. Изменение частоты автоколебаний приводит к изменению скорости расхода энергии источника (скорости опускания гири), причем поступление энергии в систему при любой частоте автоматически регулируется самой системой благодаря наличию обратной связи.

2. Электромеханические автоколебания показывают на опыте с пружинным маятником. Для этого собирают установку по рисунку 1-25. Под гирей массой 1 кг, подвешенной на пружине, располагают электромагнит, собранный из катушки на напряжение 220 В от универсального трансформатора и железного сердечника. Сверху к гире прижимают конец металлической линейки, укрепленной в лапке второго штатива. Между гирей и линейкой должен быть электрический контакт. Положение линейки регулируют так, чтобы она отходила от гири, когда последняя, двигаясь вниз, приблизится к сердечнику электромагнита на расстояние 1—2 см.

Обмотку элетромагнита соединяют с источником постоянного тока напряжением около 100 В последовательно со стойкой штатива, пружиной, линейкой, лампой накаливания и реостатом.

Соблюдая осторожность (в цепи открытые контакты!), включают напряжение, и маятник начинает совершать вертикальные незатухающие колебания. Амплитуда автоколебаний зависит от величины тока в цепи, которую регулируют с помощью реостата. Сравнительно большой период этих колебаний (около 1,2 с) облегчает наблюдение за работой автоколебательной системы, принцип действия которой аналогичен электрическому звонку.

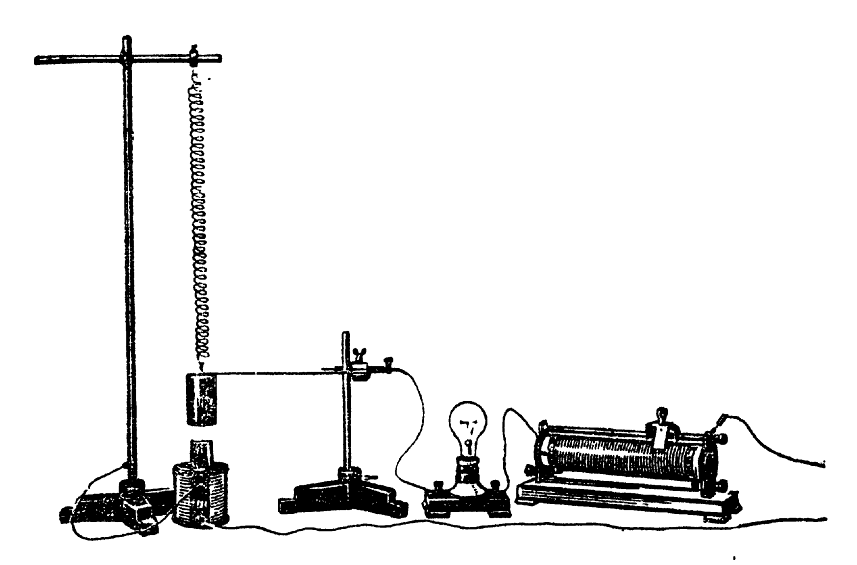


Рис. 1-25. Установка для демонстрации автоколебаний пружинного маятника.

Наличие в цепи лампы накаливания позволяет следить за временем действия электромагнита, т. е. временем поступления энергии от источника в колебательную систему.

Частоту колебаний маятника можно изменять, уменьшая или увеличивая число работающих витков пружины. Для этого ее верхний конец ввертывают в держатель, как это описано в предыдущих опытах.

Периодическое включение и выключение тока в цепи можно получить при помощи фотореле (рис. 1-26). Около маятника с электромагнитом фотореле располагают так, чтобы гиря в состоянии равновесия закрывала доступ дневного света к фоторезистору.

В исполнительную цепь фотореле последовательно включают обмотку электромагнита, лампу накаливания (127 В, 100 Вт) и реостат сопротивлением 200 Ом. Соблюдая осторожность (в цепи открытые контакты!), входную цепь фотореле питают от сети переменного тока напряжением 127 или 220 В.

Для защиты от постороннего света на фоторезистор надевают небольшую трубку из черной бумаги.

Маятник отклоняют рукой от положения равновесия и отпускают. Когда гиря поднимется до верхнего положения, она открывает доступ света к фоторезистору. Фотореле срабатывает и включает исполнительную цепь. При этом на гирю начинает действовать электромагнит. Благодаря инерции фоторезистора цепь электромагнита остается включенной все время, пока гиря движется вниз. В самом нижнем положении цепь выключается и действие электромагнита прекращается. При движении гири

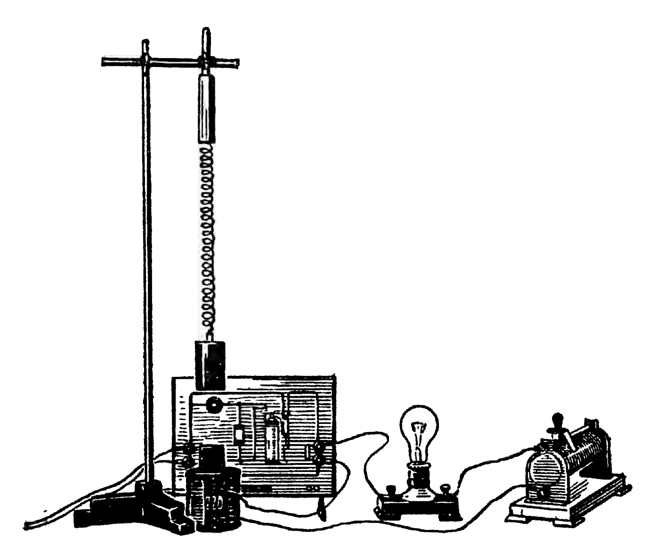


Рис. 1-26. Установка с фотореле для демонстрации автоколебаний пружинного маятника.

вверх цепь электромагнита остается выключенной. Момент включения и выключения цепи легко наблюдать по миганию лампы.

Обращают внимание учащихся, что и в данном случае частота автоколебаний определяется частотой собственных колебаний системы, амплитуда — величиной тока в цепи электромагнита, поступление энергии автоматически регулируется самой системой благодаря наличию своеобразной обратной связи.

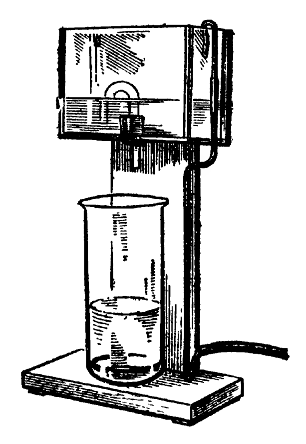


Рис. 1-27. Прибор для демонстрации релаксационных колебаний уровня воды в сосуде.

В заключение демонстрируют автоколебания в системе, которая сама по себе не может совершать свободных колебаний. С этой целью собирают установку по рисунку 1-27. Верхний сосуд размером $5 \times 12 \times 17$ см должен быть прозрачным; в его дно вставлена резиновая пробка с изогнутой стеклянной трубкой диаметром около 1 см. Под сосуд подставляют стакан.

С помощью изогнутой металлической трубки, укрепленной сбоку стойки, соединяют верхний сосуд резиновой трубкой с водопроводом, приоткрывают кран и обращают внимание учащихся на медленно поднимающийся уровень воды в сосуде. Как только вода закроет изогнутое колено трубки, начинает действовать сифон. Вода быстро переливается из верхнего сосу-

да в нижний, несмотря на ее непрекращающийся приток из водопровода. Вытекание воды через сифон прекращается, когда ее уровень упадет до верхнего конца изогнутой трубки. После этого сосуд снова наполняется водой, и все явления повторяются.

Итак, уровень воды в сосуде колеблется с периодом, определяемым не собственными колебаниями системы, а временем наполнения сосуда и выливания воды через сифонную трубку, т. е. временем релаксации системы. Поэтому такие автоколебания называют релаксационными. Полезно дать график этих колебаний и отметить их большое распространение в природе и технике.

ОПЫТ 13. ПРИМЕНЕНИЕ МАЯТНИКА В ЧАСАХ

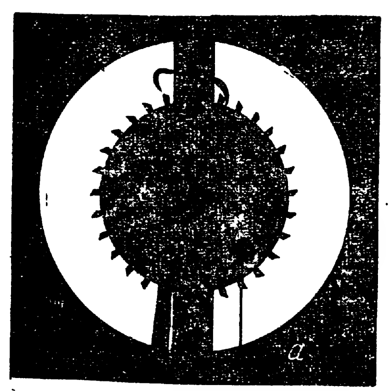
Оборудование: 1) маятник в часах на подставке, 2) аппарат проекционный, 3) кинофильм «Колебания и волны», ч. II, 4) кинопроектор.

Опыт показывают с учебным прибором — маятник в часах (см. рис. 1-24). Сначала учащихся кратко знакомят с его устройством, чтобы выяснить принцип действия. Обращают внимание на основные части: маятник с анкерной вилкой и храповое колесо с гирей.

Затем прибор демонстрируют в действии при различной длине маятника. Учащиеся наблюдают, как при каждом колебании маятника гиря, немного опускаясь, поворачивает храповое колесо. Если удары отбиваются с неравными промежутками времени, то изменяют наклон стойки прибора и добиваются необходимой равномерности хода.

Для детального изучения действия анкерного механизма его показывают с помощью проекционного аппарата. Увеличенный и резко очерченный на экране силуэт механизма становится отчетливо виден учащимся всего класса.

Когда маятник движется влево, правый зубец анкерной вилки упирается в один из зубцов колеса, как показано на рисуке 1-28 *а*,



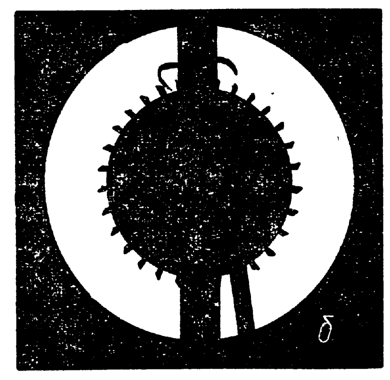


Рис. 1-28. Изображение на экране анкерного механизма часов при отклонении маятника влево (*а*) и вправо (*б*).

и держит его неподвижным до тех пор, пока маятник, двигаясь обратно, не пройдет положение равновесия. В этот момент правый зубец анкерной вилки поднимается, и колесо, выйдя из зацепления, повертывается на ползубца, так как опустившийся левый зубец вилки снова останавливает колесо (рис. 1-28, *б*).

Если проследить за направлением силы, с которой зубцы колеса действуют на анкерную вилку, то можно заметить, что эта сила создает вращающий момент и, разгоняя маятник, сообщает ему некоторое количество кинетической энергии. Эта энергия компенсирует затрату энергии на преодоление трения, вследствие чего колебания маятника становятся незатухающими. Наблюдая работу анкерного механизма, можно заметить, что энергия поднятой гири передается маятнику равными порциями дважды за период.

Уяснению этих вопросов поможет также демонстрация учебного звукового кинофильма «Колебания и волны». Принцип действия анкерного механизма подробно показывается в пятом фрагменте кинофильма «Применение маятника в часах».

§ 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ОПЫТ 14. МЕДЛЕННЫЕ ЗАТУХАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ (ИНДИКАТОР-ГАЛЬВАНОМЕТР)

Оборудование: 1) гальванометр от демонстрационного амперметра, 2) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 3) катушка дроссельная с сердечником, 4) выпрямитель универсальный ВУП, 5) переключатель однополюсный, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) ящик-подставка.

При изучении механических колебаний обычно прибегают к демонстрации такой механической колебательной системы (маятник, груз на пружине), в которой колебания совершаются с возможно большим периодом. В этом случае лучше усваивается влияние массы и упругости на период колебаний, раздельно наблюдаются характерные моменты в процессе превращения энергии. На этом же основании целесообразно для аналогичного объяснения свободных электрических колебаний пользоваться электрическим колебательным контуром с возможно меньшей собственной частотой и малым затуханием.

В условиях физического кабинета средней школы наилучшие результаты можно получить от установки, изображенной на рисунке 1-29. В ней колебательный контур составлен из батареи конденсаторов с полной емкостью 58 мкФ и дроссельной катушки из 3600 витков с замкнутым сердечником от универсального трансформатора. Посредством однополюсного переключателя батарею можно поочередно переключать на заряд от источника постоянного тока напряжением 100—120 В (ВУП) и на разряд через дроссельную катушку.

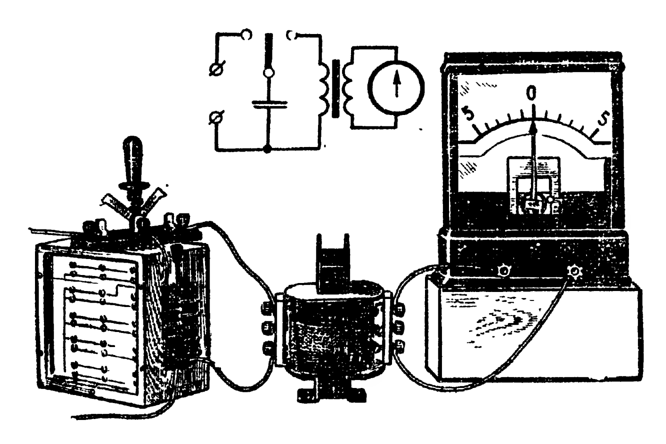


Рис. 1-29. Электрический колебательный контур.

В данной установке электрическая цепь имеет оголенные участки, поэтому при проведении опытов необходимо соблюдать осторожность.

Индикатором колебаний служит гальванометр от демонстрационного амперметра с внутренним сопротивлением 385 Ом. С катушкой колебательного контура он связан индуктивно посредством небольшой однослойной обмотки, намотанной поверх дроссельной катушки. Две части этой обмотки в 15 и 25 витков подведены к трем зажимам. Для связи пользуются всей обмоткой из 40 витков.

Сначала заряжают конденсатор и, переключив его на катушку, показывают, что разряд конденсатора имеет колебательный характер, так как стрелка гальванометра при этом совершает несколько затухающих колебаний с частотой около 2 Гц. Опыт повторяют несколько раз и объясняют наблюдаемое явление, прибегая к механической аналогии. При этом сопоставляют энергетические превращения в электрическом контуре и в механической колебательной системе; сравнивают роль индуктивности и массы, емкости и упругости, электрического и механического сопротивлений.

Далее показывают, что, поскольку колебания в контуре не «навязываются» извне, а являются свободными, частота колебаний зависит только от параметров самого контура и является собственной частотой данного контура. Для этого уменьшают сначала емкость батареи, затем количество витков катушки в контуре и, возбуждая колебания, получают заметное увеличение частоты колебаний стрелки.

При подготовке установки надо иметь в виду, что большое значение для успешного проведения опыта имеет подбор напряжения, подаваемого на конденсатор при его зарядке, а также выбор индикатора и связь его с колебательным контуром.

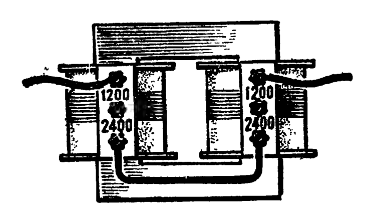


Рис. 1-30. Соединение двух дроссельных катушек.

Для получения возможно большего числа колебаний необходимо увеличить первоначальный запас энергии в конденсаторе. Для этого надо увеличить напряжение источника. Оказывается, однако, что при увеличении напряжения, подаваемого на конденсатор, выше 130 В амплитуда колебаний такова, что сердечник катушки приближается к насыщению. Это приводит к уменьшению индуктивности катушки, частота колебаний резко возрастает, что крайне нежелательно. Наилучшие результаты получаются при напряжении около 120 В.

Естественно, что гальванометр, подключенный к колебательному контуру, отбирает от него некоторую часть энергии и тем самым увеличивает затухание. Поэтому наилучшим индикатором будет гальванометр с наибольшей чувствительностью. В зависимости от чувствительности и внутреннего сопротивления гальванометра должно быть подобрано число витков катушки связи. Для гальванометра сопротивлением 2,3 Ом (от демонстрационного вольтметра) обмотка, намотанная поверх дроссельной катушки, слишком велика, но она хорошо согласуется с данными гальванометра сопротивлением 385 Ом (от демонстрационного амперметра).

При наличии в физическом кабинете двух дроссельных катушек период колебаний может быть заметно увеличен, если обе катушки насадить на сердечник и согласованно их соединить (рис. 1-30). Одна из обмоток связи в этом случае не используется. Такое увеличение периода значительно усиливает эффект опыта.

ОПЫТ 15. ЗАТУХАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ (ИНДИКАТОР-ОСЦИЛЛОГРАФ)

Оборудование: 1) осциллограф электронный ОЭШ, 2) батарея конденсаторов емкостью 8 мкФ, 3) катушка «127—220» от универсального трансформатора, 4) реостат сопротивлением 600 Ом, 5) трансформатор на панели, 6) диоды из набора полупроводниковых приборов, 7) ящик-подставка, 8) провода соединительные с наконечниками.

Из предыдущего опыта учащиеся получают начальное представление о колебательном контуре. Однако в дальнейшем им придется иметь дело с такими частотами, при которых нельзя непосредственно наблюдать все стадии колебания. В таких случаях приходится пользоваться электронным осциллографом.

Для получения осциллограммы затухающих колебаний необходимо создать периодические кратковременные электрические импульсы, заряжающие конденсатор в колебательном контуре.

Полное затухание колебаний должно происходить в паузах между импульсами. Существуют различные способы периодического возбуждения затухающих колебаний. Ниже описаны два наиболее простых способа, не требующие изготовления специальных приборов.

Для возбуждения колебательного контура можно воспользоваться импульсами, получаемыми при однополупериодном выпрямлении переменного тока. В этом случае пауза между импульсами в 0,01 с достаточна для возникновения и полного затухания колебаний в контуре.

Общий вид установки для получения осциллограммы затухающих колебаний и ее схема представлены на рисунке 1-31. Установка состоит из однополупериодного выпрямителя, колебательного контура и электронного осциллографа. Импульсы переменного тока напряжением 4 В, проходя через полупроводниковый диод, периодически заряжают конденсатор. В промежутке между импульсами конденсатор разряжается через катушку и реостат. Разряд имеет колебательный характер и на экране осциллографа наблюдается осциллограмма затухающих колебаний.

Опыт лучше провести в такой последовательности. Сначала отключают конденсатор (ставят стержень конденсатора на нуль) и демонстрируют кривую импульсов при однополупериодном выпрямлении, настроив осциллограф так, чтобы на оси *Ох* поместились два периода. Тогда при включении конденсатора можно будет наблюдать две осциллограммы затухающего колебания

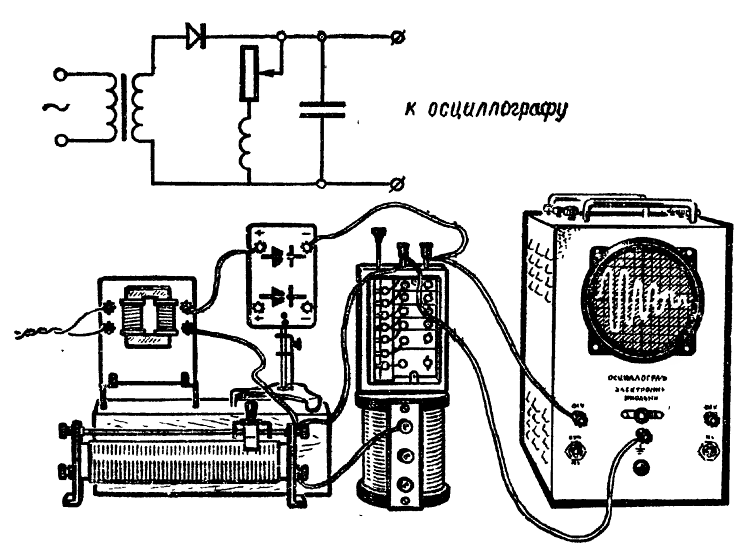
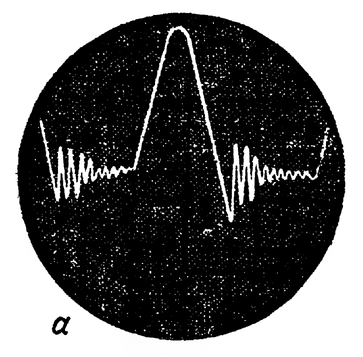
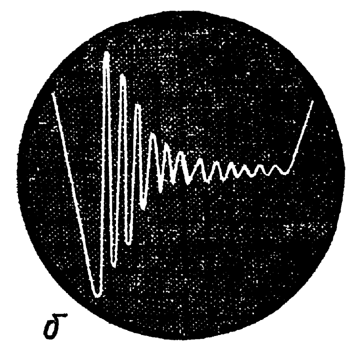


Рис. 1-31. Установка для получения осциллограммы затухающих колебаний.





а *б*

Рис 1-32 Осциллограмма затухающих колебаний.

(рис. 1-32, *а*). Далее уменьшают частоту развертки и тем самым увеличивают масштаб так, чтобы одна осциллограмма колебаний заняла весь экран (рис. 1-32, *б*).

После этого показывают изменение частоты колебаний при изменении емкости конденсатора и индуктивности катушки. Изменяя сопротивление реостата, обращают внимание на то, что от этого не только уменьшается начальная амплитуда колебаний, но и увеличивается быстрота затухания.

Для получения периодических импульсов вместо отдельного генератора можно воспользоваться генератором горизонтальной развертки осциллографа. Установка для демонстрации (рис. 1-33) содержит тот же колебательный контур из конденсаторной батареи, катушки и реостата; отличие состоит в том, что зажим конденсаторной батареи, соединенный с зажимом вертикального входа осциллографа, подключен через конденсатор 0,2—0,5 мкФ к любой из горизонтально отклоняющих пластин электронолу-

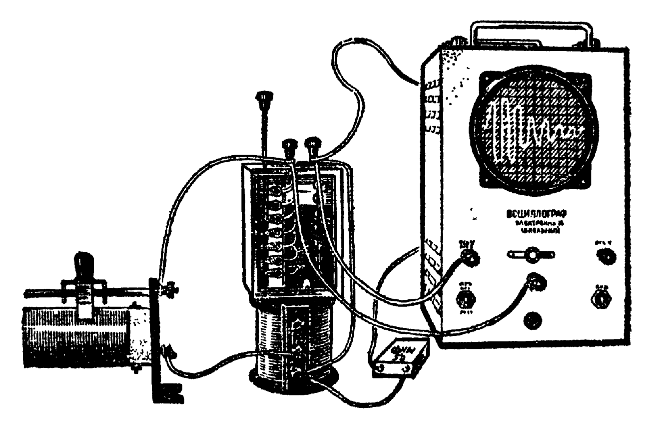


Рис. 1-33. Установка с возбуждением колебательного контура от генератора горизонтальной развертки.

чевой трубки. Поскольку импульсы, подаваемые с пластины горизонтальной развертки, имеют большую остроту и направлены одинаково, осциллограмма затухающих колебаний совсем не искажена и размещена по всей длине оси *x*.

ОПЫТ 16. НАБЛЮДЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАММЫ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Оборудование: 1) осциллограф электронный ОЭШ, 2) генератор звуковой школьный, 3) машина магнитоэлектрическая, 4) трансформатор на панели, 5) лампа накаливания миниатюрная МН 3,5 В; 0,28 А на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками.

В отличие от свободных колебаний вынужденные колебания в электрической цепи возбуждаются постоянно действующим источником ЭДС. Часто таким источником является индукционный генератор переменного тока.

Приступая к более глубокому изучению свойств переменного тока, показывают с помощью осциллографа, что график переменного тока, питающего большую часть наших промышленных установок и бытовых приборов, имеет синусоидальную форму. Однако целесообразно продемонстрировать также переменный ток, в котором изменения совершаются по другим законам, и сравнить полученные осциллограммы.

Для сравнения осциллограмм их надо демонстрировать одну за другой без перестройки осциллографа. Поэтому желательно, чтобы частоты и амплитуды токов, подлежащих сравнению, были по возможности одинаковыми. Такие токи можно получить от осветительной сети через трансформатор, понижающий напряжение до 4 В, и от школьной магнитоэлектрической машины, которая при нормальном вращении ручного привода дает переменный ток частотой около 50 Гц и так же нормально накаливает указанную в перечне оборудования лампу.

При демонстрации осциллограмм лампу все время оставляют присоединенной к входным зажимам осциллографа, а вторую

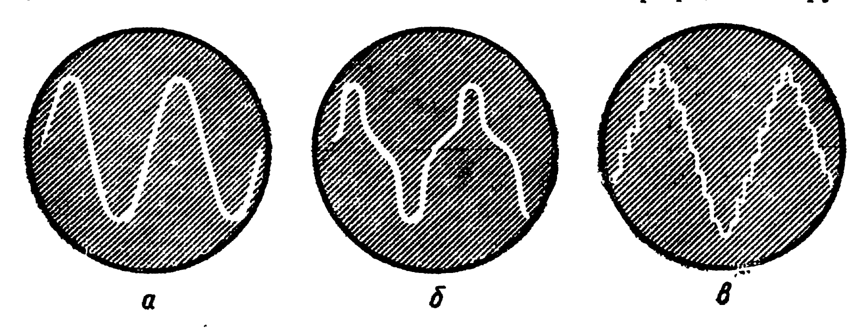


Рис. 1-34 Осциллограмма переменного тока от:
а — осветительной сети, *б* — магнитоэлектрической машины; *в* — генератора из набора по трехфазному току.

пару проводов от нее присоединяют поочередно к каждому из источников. На рисунке 1-34, *а* и *б* изображены осциллограммы тока в лампе, полученного от осветительной сети и от магнитоэлектрической машины. Если позволит время, полезно показать еще одну осциллограмму (рис. 1-34, *в*); ее можно получить от одной из трех обмоток генератора из набора по трехфазному току. К сожалению, от этого прибора нельзя получить ток такой же частоты, если пользоваться ручным приводом. Поэтому частоту горизонтальной развертки осциллографа придется уменьшить.

Для иллюстрации рассказа о частоте, периоде и амплитуде переменного тока осциллограф и лампу присоединяют к зажимам низкоомного выхода звукового генератора, настроенного предварительно на частоту 50 Гц и минимум амплитуды. Поворачивая регулятор амплитуды, доводят накал лампы до нормального и включают громкоговоритель так, чтобы звучание было не громким. При этих условиях на экране осциллографа будет получена такая же синусоида, как и в предыдущем опыте. Горение лампы теперь сопровождается звучанием громкоговорителя. Поворачивая регулятор амплитуды, наблюдают одновременное изменение яркости горения лампы и громкости звука; соответственно изменяется и амплитуда кривой на экране осциллографа.

Поворачивают лимб настройки частоты. При этом яркость лампы остается прежней, а высота тона изменяется. Подстраивая частоту горизонтальной развертки осциллографа для получения устойчивого изображения, демонстрируют соответствующее увеличение числа волн синусоиды.

ОПЫТ 17. АМПЛИТУДНОЕ И ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Описанные ниже варианты опыта носят иллюстративный характер; цель их проведения — экспериментальное подтверждение выведенного теоретически соотношения между амплитудным и действующим значениями напряжения при переменном токе:

$$\frac{U_0}{U} = \sqrt{2}.$$

1. Оборудование: 1) вольтметр демонстрационный, 2) лампа неоновая ТН-30 в патроне, 3) выпрямитель универсальный ВУП, 4) регулятор напряжения РНШ, 5) провода соединительные с наконечниками.

Установка для проведения опыта изображена на рисунке 1-35. Она дает возможность измерить минимальное напряжение, которое необходимо для зажигания лампы при постоянном и переменном токе. При первом измерении мы непосредственно находим напряжение зажигания, а при втором вольтметр показывает действующее значение напряжения, когда амплитуда напряжения достигает уже измеренного ранее напряжения за-

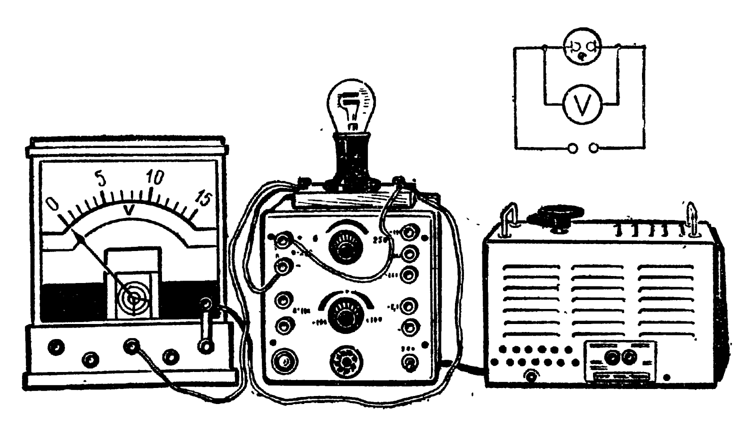


Рис. 1-35. Сравнение эффективного и амплитудного значений напряжения.

жигания. Разделив напряжение зажигания на действующее напряжение переменного тока, находим, что последнее приблизительно в 1,4 раза меньше амплитудного. Это является экспериментальным подтверждением выведенного ранее соотношения.

Наиболее удобна для опыта неоновая лампа ТН-30[1]. У нее нормальный цоколь, баллон и электроды большого размера. Для измерения действующего и амплитудного напряжений надо иметь вольтметр для постоянного и переменного тока на 150 В. Школьный демонстрационный вольтметр имеет пределы 15 и 250 В для переменного тока и 5 и 15 В для постоянного, т. е. для данного опыта он не приспособлен. Чтобы обойти это затруднение, можно воспользоваться шкалами на 15 В и подобрать такие два добавочных резистора отдельно для постоянного и переменного тока, чтобы при напряжении 150 В стрелка вольтметра отклонялась на всю шкалу. В качестве добавочных резисторов лучше воспользоваться переменными резисторами, а при их регулировке руководствоваться показаниями какого-либо эталонного вольтметра.

Для успешного проведения опыта решающее значение имеет качество фильтра выпрямителя. Испытания показывают, что фильтр выпрямителя ВУП сглаживает пульсацию достаточно хорошо.

Опыт проводят в такой последовательности. К неоновой лампе присоединяют вольтметр, используя его зажимы для постоянного тока. Устанавливают ручку потенциометра в выпрямителе на нуль и к зажимам выпрямителя второй парой проводов присоединяют лампу, следя за соответствием обозначений полюсов

[1] Старое название этой лампы СН-2. Можно воспользоваться и другими лампами. Однако надо иметь в виду, что у них может быть иное напряжение зажигания.

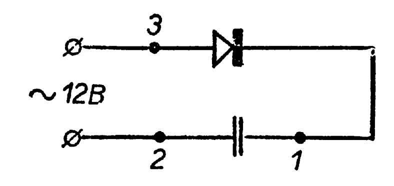


Рис. 1-36. Схема установки для сравнения эффективного и амплитудного значений напряжения.

на зажимах вольтметра и источника тока. Медленно поворачивая ручку потенциометра, наблюдают за стрелкой вольтметра и в момент зажигания лампы замечают его максимальное показание (зажигание происходит при напряжении около 75 В, после чего сразу же немного уменьшается).

Далее заменяют выпрямитель источником переменного тока с регулятором напряжения, установленным на нуль. С правого зажима вольтметра провод переносят на левый зажим (для переменного тока) и медленно увеличивают напряжение. В момент зажигания лампы вольтметр показывает действующее напряжение переменного тока (приблизительно 55 В), при котором амплитуда напряжения равна напряжению зажигания.

2. Оборудование: 1) вольтметр демонстрационный, 2) регулятор напряжения РНШ, 3) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 4) диод из набора полупроводниковых приборов, 5) провода соединительные с наконечниками.

Описанный ниже способ дает менее точный результат, но позволяет обойтись вольтметром со шкалами на 15 В для постоянного и переменного тока и соответствующими им добавочными резисторами.

Установку для проведения измерений собирают по схеме, изображенной на рисунке 1-36.

В течение одной половины периода ток, проходя через диод, каждый раз заряжает конденсатор до амплитудного значения напряжения, которое и сохраняется на зажимах конденсатора. Это напряжение между точками *1* и *2* измеряют вольтметром постоянного тока. Затем вольтметром переменного тока измеряют напряжение между точками *2* и *3* и находят отношение амплитудного напряжения к действующему. Результат будет отличаться от ожидаемого не только из-за погрешностей измерений, но и из-за небольшой утечки заряда через вольтметр.

ОПЫТ 18. ЕМКОСТНОЕ И ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 3) трансформатор универсальный, 4) реостат сопротивлением 6—10 Ом из набора для фронтальных работ, 5) лампа накаливания миниатюрная МН 3,5 В; 0,28 А на подставке, 6) громкоговоритель электродинамический, 7) переключатель однополюсный, 8) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 9) провода соединительные с наконечниками, 10) ящики-подставки.

Этот опыт показывает, какое действие оказывают на лампу включенные последовательно с ней реостат, конденсатор или

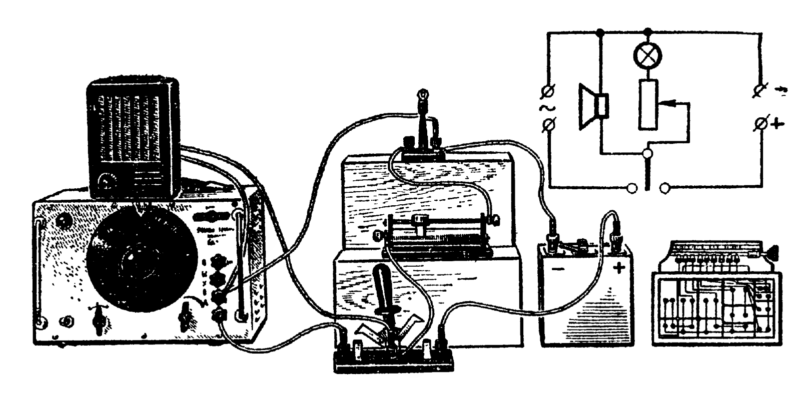


Рис. 1-37. Схема и установка для демонстрации индуктивного и емкостного сопротивлений в цепи переменного тока.

катушка с железным сердечником при питании цепи постоянным, а затем переменным током.

Установка для проведения опыта и ее схема изображены на рисунке 1-37. Последовательно с лампой на 3,5 В и 0,28 А включен реостат сопротивлением 6 Ом. Источником тока в зависимости от положения переключателя служит аккумуляторная батарея [1] или звуковой генератор. Параллельно лампе и реостату присоединен громкоговоритель, который служит звуковым индикатором изменения частоты. Он должен иметь свой собственный регулятор, при помощи которого громкость звучания снижают до минимума. В звуковом генераторе используется низкоомный выход (5 Ом).

Перед демонстрацией опыта звуковой генератор настраивают на частоту около 300 Гц и устанавливают такую амплитуду колебаний, чтобы при попеременном включении аккумуляторов и звукового генератора лампа горела с одинаковой яркостью. Изменяя в небольших пределах частоту переменного тока, показывают, что при этом изменяется высота тона громкоговорителя, но яркость горения лампы остается постоянной. Затем изменяют сопротивление реостата и устанавливают, что эффект от такого изменения при постоянном и переменном токе одинаков.

Заменив реостат батареей конденсаторов емкостью 58 мкФ, показывают, что конденсатор при любой емкости не пропускает постоянного тока. При включении же переменного тока лампа загорается и горит почти полным накалом. Уменьшение емкости конденсатора вызывает ослабление накала лампы. Следовательно, конденсатор оказывает сопротивление переменному току тем меньше, чем больше емкость конденсатора. Изменяя частоту переменного тока в пределах 200—2000 Гц, показывают, что с

---

[1] Вместо аккумуляторной батареи можно воспользоваться выпрямителем ВУП.

увеличением частоты при постоянной емкости конденсатора яркость горения лампы увеличивается. Таким образом, сопротивление конденсатора переменному току уменьшается с увеличением частоты тока. На основании результатов этого исследования вводят понятие о емкостном сопротивлении и выводят формулы его зависимости от емкости и частоты:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ и } X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Аналогично демонстрируют индуктивное сопротивление и его зависимость от индуктивности и частоты. Для этого вместо реостата и конденсатора последовательно с лампочкой включают катушку на 120 В от универсального трансформатора. В этом случае при питании постоянным током лампа накаливается так же, как и с реостатом, а при включении переменного тока накал лампы оказывается заметно слабее. Внесение внутрь катушки ярма от сердечника трансформатора, т. е. увеличение индуктивности, совсем гасит лампу. Такое же действие оказывает и увеличение частоты. Эти опыты раскрывают понятие об индуктивном сопротивлении и служат основанием для вывода формул

$$X_L = \omega L \text{ и } X_L = 2\pi\nu L.$$

ОПЫТ 19. СДВИГИ ФАЗ В ЦЕПЯХ С ЕМКОСТЬЮ И ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Оборудование: 1) регулятор напряжения РНШ, 2) осциллограф электронный ОЭШ, 3) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 4) трансформатор универсальный, 5) реостат сопротивлением 100 Ом — 2 шт., 6) штатив универсальный, 7) панель соединительная, 8) провода соединительные с наконечниками.

В цепи переменного тока на участке, содержащем емкость или индуктивность, колебания тока происходят не в одной фазе с колебаниями напряжения. В первом случае колебания тока опережают по фазе колебания напряжения, во втором — отстают от них. И в том и в другом случае разность фаз может принимать любые значения в пределах от 0 до $\pi/2$ в зависимости от соотношения между значениями активного и реактивного сопротивлений данного участка.

Фазовые сдвиги для цепей с емкостью и индуктивностью исследуют раздельно. Сначала собирают установку, изображенную на рисунке 1-38. В этой установке включены два одинаковых реостата сопротивлением 100 Ом каждый и конденсаторная батарея с включенной емкостью 8 мкФ. На зажимах батареи предусмотрен проводничок, которым можно при необходимости закоротить зажимы конденсаторной батареи. Вся цепь питается от источника переменного напряжения 30—40 В.

Чтобы избежать путаницы проводов и улучшить наглядность установки, полезно применить отдельную соединительную па-

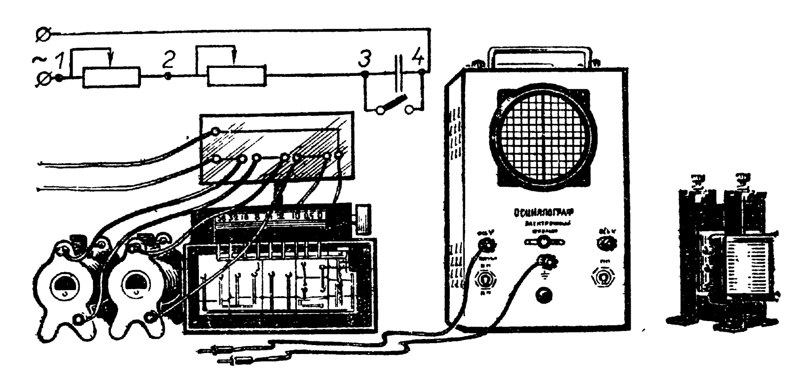


Рис. 1-38. Установка для демонстрации сдвига фаз в цепи с емкостью.

нель, к которой подают напряжение и присоединяют указанные выше приборы.

Для получения на экране осциллографа кривой силы тока в конденсаторе, вертикальный вход осциллографа присоединяют к зажимам первого реостата (на панели). При этом получают кривую напряжения, но рассматривают ее как кривую силы тока в конденсаторе. Это вполне допустимо, поскольку фазы колебания силы тока на всех последовательных участках одинаковы, а на реостате, имеющем чисто активное сопротивление, фазы колебания силы тока и напряжения совпадают.

Пользуясь ручками управления осциллографом, кривую силы тока размещают на экране так, чтобы она проходила через точку пересечения координатных осей сетки, как показано на рисунке 1-39; полученную осциллограмму вместе с координатными осями вычерчивают на доске и обозначают ее буквой *I* (рис. 1-40).



Рис 1-39. Кривая силы тока на участке с емкостным сопротивлением.

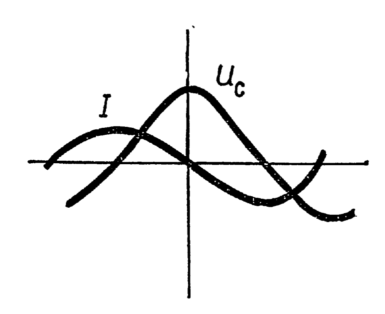


Рис. 1-40. Кривые тока и напряжения на участке с емкостным сопротивлением, вычерченные на классной доске.

Далее осциллограф присоединяют к зажимам второго реостата и конденсатора. Полученная кривая напряжения на этом участке не совпадает с кривой тока.

Чтобы получить правильное взаимное расположение кривых, конденсатор закорачивают, соединив проводничком его зажимы, а сопротивление соединенного с ним реостата доводят до предела. Если после этого кривая совпадет по фазе с ранее полученной кривой, значит, осциллограф включен правильно. Если фазы их окажутся противоположными, надо провода от осциллографа на зажимах участка цепи поменять местами.

Следует придерживаться такого правила: переключая провода от осциллографа с одного участка цепи на другой, необходимо сохранять порядок взаимного расположения проводов, т. е. один из проводов осциллографа на всех участках цепи присоединять всегда к левому концу любого участка, а другой — к правому.

Надо показать и объяснить учащимся, что кривые силы тока (а также и напряжения) на двух участках, содержащих только активные сопротивления, совпадают по фазе.

Сняв с конденсатора перемычку, вновь получают кривую с участка, состоящего из второго реостата и конденсатора. Она сдвинута по отношению к кривой тока, начерченной на доске, вправо. Уменьшая сопротивление реостата до нуля, показывают, что кривая сдвигается еще дальше и разность фаз достигает четверти периода (рис. 1-41). Чертеж на доске (см. рис. 1-40) дополняют полученной кривой и обозначают ее буквой U_C. Рассматривая кривые, убеждаются, что на участке, содержащем только емкостное сопротивление, колебания напряжения отстают от колебаний силы тока на $\pi/2$.

Затем вместо батареи конденсаторов и второго реостата включают катушку «220» с сердечником и наполовину сдвинутым ярмом. Наблюдаемая теперь на экране осциллографа кривая напряжения сдвинута влево по отношению к кривой тока.

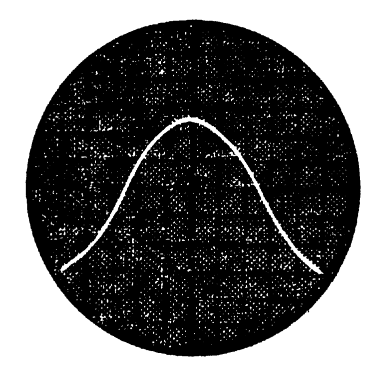


Рис. 1-41. Кривая напряжения на участке с емкостным сопротивлением.

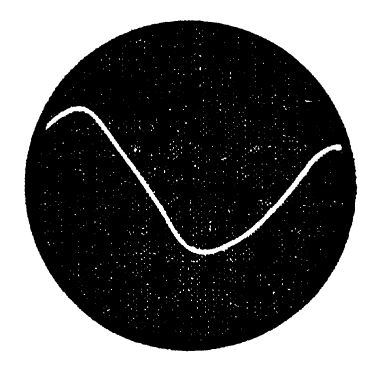


Рис. 1-42. Кривая напряжения опережает кривую тока.

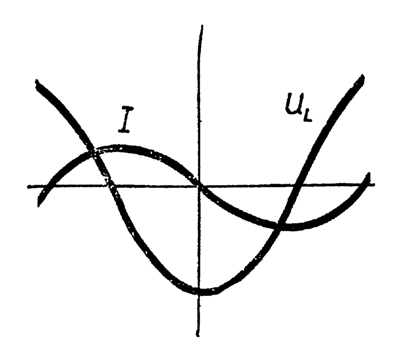


Рис. 1-43. Кривые тока и напряжения на участке с индуктивным сопротивлением, вычерченные на классной доске.

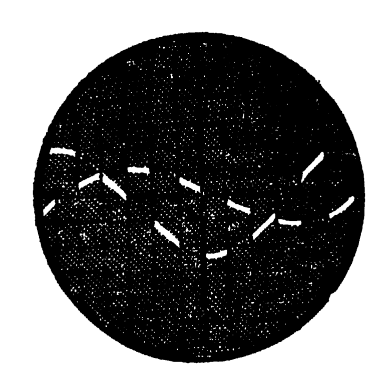


Рис. 1-44. Одновременное получение на экране осциллографа двух кривых с помощью коммутатора.

Следовательно, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения (рис. 1-42). Одновременно можно заметить, что сдвиг фаз в этом случае меньше, чем $\pi/2$. Это объясняется тем, что катушка обладает не только реактивным, но и небольшим активным сопротивлением, устранить которое невозможно. Наличие этого сопротивления освобождает от необходимости включать дополнительно реостат.

Полученные на экране осциллографа кривые тока и напряжения на участке с индуктивностью вычерчивают на доске (рис. 1-43) и сравнивают их с кривыми, полученными для участка с емкостью.

Для переключения осциллографа с одного участка на другой можно воспользоваться автоматическим быстродействующим переключателем (коммутатором). Известны электромеханический и электронный коммутаторы. Лучше воспользоваться электронным коммутатором.

Электронный коммутатор чаще конструируют так, чтобы частота переключения превышала частоту исследуемых колебаний не менее чем в десять раз. В этом случае вертикальный вход осциллографа в течение одного периода исследуемого колебания несколько раз переключается с одного участка на другой, вследствие чего электронный пучок вычерчивает на экране две пунктирные кривые, наблюдаемые практически одновременно (рис. 1-44).

Некоторые коммутаторы дают возможность получать кривые, отличающиеся по внешнему виду [1]. Из них одна может быть сплошной, а другая — пунктирной. Кривые могут также отли-

---

[1] См.: Метляев Т. Н. Коммутаторы к электронному осциллографу и опыты с ними.— В сб.: Физический эксперимент в школе. Вып. 4. М., 1973, с. 158.

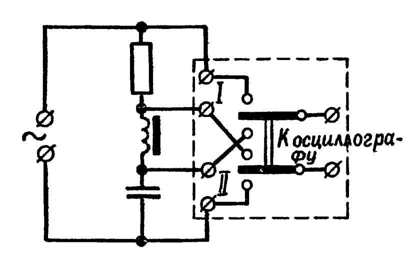


Рис. 1-45. Схема коммутатора с разделенными входами, переключающего осциллограф с резистора на конденсатор.

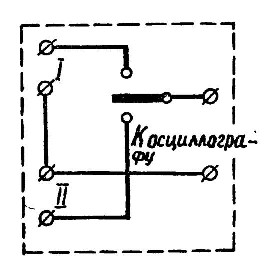


Рис. 1-46. Схема коммутатора с неразделенными входами.

чаться длиной штрихов, которыми они образованы. Если кривые не различаются, то определить, какая из них представляет собой силу тока, а какая — напряжение, можно путем воздействия на один из участков, подключенных к двум входам коммутатора, например изменением емкости или сопротивления. Соответствующая этому участку кривая немедленно обнаружит себя каким-либо изменением.

Для экспериментального исследования сдвига фаз, описанного выше, пригоден только коммутатор с разделенными входами[1]. Упрощенная схема такого коммутатора (безразлично электромеханического или электронного) представлена на рисунке 1-45. Коммутатор с разделенными входами в отличие от коммутатора, у которого два входа имеют общую точку (рис. 1-46), дает возможность снимать кривые напряжения одновременно с любых двух участков цепи (в том числе и не смежных), соблюдая изложенное выше правило о порядке взаимного расположения проводов.

Проводя исследование сдвига фаз (с коммутатором или без него), следует обратить внимание учащихся, что обе кривые, наблюдаемые на экране одновременно или поочередно, являются кривыми напряжения. По этим кривым можно судить о фазах и амплитудах напряжения на двух исследуемых участках. Однако напряжение на участке с активным сопротивлением и сила тока на всех участках совпадают по фазе. Поэтому, как было сказано выше, мы вправе кривую напряжения на участке с активным сопротивлением принять за кривую тока. Однако судить об амплитуде силы тока по величине амплитуды исследуемой кривой, разумеется, нельзя. Да в этом и нет необходимости, так как в задачу исследования входит только определение величины и направления сдвига фаз.

---

[1] Схема со всеми необходимыми данными коммутатора с разделенными входами дана в кн: Учебное оборудование по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., 1973, с. 256.

ОПЫТ 20. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СМЕШАННОЙ НАГРУЗКОЙ

Оборудование: 1) выпрямитель ВС-24 М, 2) вольтметр демонстрационный, 3) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 4) трансформатор универсальный, 5) лампа накаливания миниатюрная МН 6,3 В; 0,22 А на подставке с зажимами, 6) провода соединительные с наконечниками.

Для исследования распределения напряжений на различных участках цепи переменного тока, содержащей активное, емкостное и индуктивное сопротивления, соединяют последовательно лампу накаливания МН-6,3—0,22, катушку «120» трансформатора, надетую на железный сердечник, и батарею конденсаторов с включенной емкостью 32 мкФ. Сдвинув до половины ярмо сердечника, на собранную установку (рис. 1-47) подают напряжение 9 В от выпрямителя ВС-24 М с зажимов переменного тока. При этих условиях лампа горит слабым накалом. Для измерения напряжения берут демонстрационный вольтметр с добавочным резистором и шкалой переменного тока для измерения напряжений до 15 В, присоединяют к нему достаточно длинные провода и измеряют напряжение отдельно на зажимах конденсатора, катушки и лампы. Затем измеряют напряжение на концах всей установки и записывают результаты измерений. Например: $U_C = 16$ В, $U_L = 8{,}7$ В, $U_R = 3{,}2$ В, $U = 9$ В.

Обращают внимание учащихся на то, что общее напряжение не равно сумме напряжений, измеренных на отдельных участках.

Далее закорачивают батарею конденсаторов и показывают, что при этом лампа гаснет или накал ее уменьшается. К такому же результату приводит и закорачивание катушки. Таким образом оказывается, что при уменьшении емкостного или индуктивного сопротивления полное сопротивление цепи не уменьшается, а увеличивается.

В предыдущем опыте учащиеся наблюдали на экране осциллографа графики колебаний тока и напряжения и установили, что колебания напряжения на емкостной нагрузке отстают по фазе от колебаний тока на $\pi/2$, а на индуктивной нагрузке на столь-

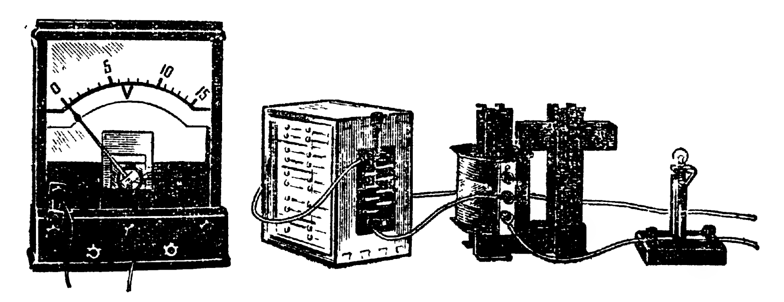


Рис. 1-47 Установка для демонстрации распределения напряжений в цепи переменного тока со смешанной нагрузкой.

ко же их опережают. Отсюда следует, что разность фаз между колебаниями напряжения на емкостной и индуктивной нагрузках составляет $\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{2}=\pi$, т. е. их фазы противоположны. Из этого следует, что результирующее напряжение на концах участка, состоящего из катушки и конденсатора, равно разности составляющих напряжений. В самом деле, вольтметр, присоединенный к концам этого участка, показывает приблизительно 7,3 В. Следовательно,

$$U_{CL}=U_C-U_L.$$

Проведенные опыты и рассуждения до некоторой степени могут служить основанием для выведения формулы

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_C-U_L)^2}.$$

Согласно этой формуле напряжение на концах группы проводников, содержащей активное и реактивное сопротивления, равно векторной сумме напряжений на отдельных ее участках.

По закону Ома

$$U=IZ,\ U_R=IR,\ U_C=IX_C,\ U_L=IX_L.$$

Следовательно,

$$Z=\sqrt{R^2+(X_C-X_L)^2},$$

где Z — общее сопротивление всей цепи, R — ее активное сопротивление, X_C — емкостное сопротивление, а X_L — индуктивное сопротивление.

Из рассмотрения приведенной формулы и из результатов проведенного опыта легко заключить, что сопротивление всей демонстрируемой цепи будет равно сопротивлению лампы:

$$Z=R,$$

когда $X_C-X_L=0$, т. е. $X_C=X_L$.

В нашей установке $U_C=16$ В, а $U_L=8{,}7$ В. Следовательно, $X_C>X_L$. Но

$$X_C=\frac{1}{2\pi\nu C},$$

отсюда ясно, что для уменьшения X_C надо увеличить емкость C. Увеличим емкость с 32 до 58 мкФ. При этом лампа ярко загорается. Измерение напряжений показывает, что теперь и на конденсаторе, и на катушке напряжение почти одинаково (13,4 и 13 В), общее же их напряжение близко к нулю (несовпадение с нулем объясняется наличием некоторого активного сопротивления обмотки катушки).

Изменяя емкость батареи или индуктивность катушки, показывают, что в том и другом случае яркость лампы уменьшается.

Напоминают учащимся, что соединение конденсатора и катушки образует колебательный контур, которому свойственна некоторая собственная частота. Очевидно, что при выравнивании индуктивного и емкостного сопротивления

$$X_C = X_L$$

собственная частота контура становится равной частоте колебания ЭДС источника тока, т. е. возникает явление резонанса.

21. КИНОФИЛЬМ «МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА»[1]

Основным содержанием фильма является показ учебных опытов и построение графиков. В первом фрагменте — «Цепь переменного тока с активным сопротивлением» — показывается определение мощности в цепи с активной нагрузкой, используется графический метод определения мощности.

Во втором фрагменте — «Цепь с индуктивностью» — и в третьем фрагменте — «Цепь с емкостью» — рассматривается связь тока и напряжения в цепях с индуктивной и емкостной нагрузками. Показано определение мгновенной мощности и мощности за период. Вводится понятие положительной и отрицательной мощности.

В четвертом фрагменте — «Коэффициент мощности» — на примере работы станка, приводимого в действие электродвигателем, показано изменение мощности и, соответственно, косинуса φ при изменении загруженности станка. Поясняется практическое значение косинуса φ. В конце фрагмента рассказывается о способах повышения косинуса φ, которое является важнейшей народнохозяйственной задачей.

ОПЫТ 22. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 3) трансформатор универсальный, 4) громкоговоритель электродинамический, 5) лампа накаливания миниатюрная МН 3,5 В; 0,28 А на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками.

Ранее было установлено, что равенство индуктивного и емкостного сопротивлений является условием для возникновения резонанса в колебательном контуре. Так как

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}, \text{ а } X_L = 2\pi\nu L,$$

можно определить собственную частоту колебательного контура

$$\frac{1}{2\pi\nu C} = 2\pi\nu L, \text{ или } \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

---

[1] Мощность переменного тока. Московская киностудия научно-популярных фильмов, 1960, 2 ч. (4 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 20 мин.

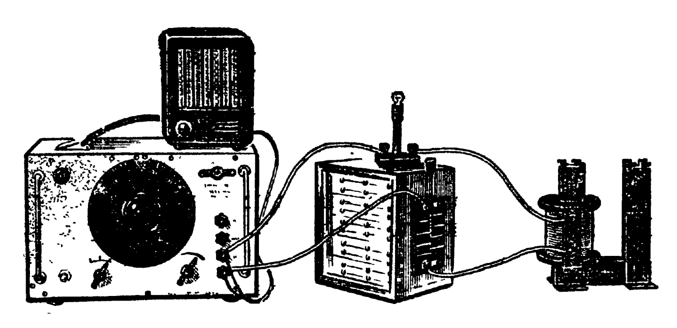


Рис. 1-48. Установка для демонстрации зависимости резонансной частоты от емкости и индуктивности колебательного контура.

Выраженную в этой формуле зависимость резонансной частоты от емкости и индуктивности колебательного контура показывают на установке, изображенной на рисунке 1-48. Установка состоит из катушки на 12 В от универсального трансформатора с незамкнутым сердечником, батареи конденсаторов и лампочки, соединенных последовательно и подключенных к низкоомному выходу звукового генератора. К этим же зажимам присоединен громкоговоритель со своим регулятором громкости. Громкоговоритель служит звуковым индикатором частоты.

Перед опытом установку заранее настраивают в резонанс. Для этого катушку трансформатора включают полностью, а на батарее устанавливают емкость 2 мкФ. Включив генератор, вращают лимб в диапазоне 2000—20 000 Гц, пока яркость лампы не станет максимальной. Это будет при частоте около 3000 Гц.

Опыт демонстрируют в следующей последовательности.

Включают генератор и, когда лампа загорается, закорачивают поочередно сначала конденсатор, затем катушку. В обоих случаях лампа светит одинаково тускло. Это значит, что при частоте 3000 Гц индуктивное и емкостное сопротивления равны. Изменяя в небольших пределах частоту, показывают, что при любом изменении частоты резонанс нарушается. Изменение частоты отмечают по высоте тона громкоговорителя.

Уменьшают индуктивность контура, включив половину витков катушки, и наблюдают нарушение резонанса. Для восстановления резонанса, как следует из формулы, частоту приходится увеличить (приблизительно до 5500 Гц).

Восстанавливают прежние условия и уменьшают емкость конденсатора до 1 мкФ. Это вновь нарушает резонанс, который восстанавливается примерно таким же увеличением частоты.

Вернув установку в исходное состояние, уменьшают индуктивность катушки, а емкость увеличивают до 4 мкФ. В соответствии с формулой нарушения резонанса почти не наблюдается.

В этих опытах нельзя получить точные количественные зависимости, так как батарея конденсаторов не может служить эта-

лоном емкости, а изменение индуктивности при переключениях на зажимах катушки не может быть определено достаточно точно.

При отсутствии генератора звуковой частоты электрический резонанс напряжений можно продемонстрировать на частоте электросети 50 Гц. Для этого соединяют последовательно катушку «220» от универсального трансформатора с замкнутым сердечником, конденсатор емкостью 4 мкФ и лампу (220 В, 100 Вт) и включают в сеть напряжением 127 В.

При уменьшении индуктивности дроссельной катушки смещением сердечника в сторону наблюдают, как при некотором положении сердечника накал нити лампы достигает максимума, а при дальнейшем перемещении убывает. Накал становится слабее, если обмотку с железа снять совсем. Если после этого на сердечник надеть катушку и постепенно надвигать ярмо, то яркость лампы снова увеличивается, достигает максимума, а затем убывает.

ОПЫТ 23. МЕДЛЕННЫЕ НЕЗАТУХАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ЛАМПОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Оборудование: 1) катушка дроссельная, 2) трансформатор универсальный, 3) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 4) гальванометр от демонстрационного вольтметра, 5) панель ламповая демонстрационная с триодом, 6) громкоговоритель электродинамический, 7) выпрямитель универсальный ВУП, 8) выключатель однополюсный демонстрационный, 9) провода соединительные с наконечниками, 10) ящик-подставка.

Получение незатухающих электрических колебаний демонстрируют с помощью лампового генератора. Как видно из рисунка 1-49, генератор состоит из знакомого учащимся колебательного контура (опыт 14), трехэлектродной лампы 6Н7С (со сдвоен-

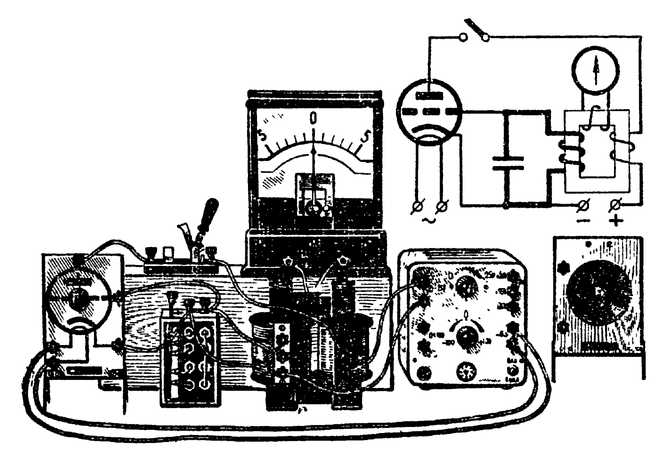


Рис. 1-49. Генератор незатухающих колебаний.

ными электродами), выпрямителя с потенциометром, с помощью которого можно регулировать напряжение в анодной цепи, и катушки на 220 В с сердечником от универсального трансформатора, включенной в анодную цепь лампы и имеющей индуктивную связь с катушкой колебательного контура. Для обнаружения колебаний, возникающих в колебательном контуре, добавочную обмотку (красного цвета), намотанную поверх дроссельной катушки, присоединяют к зажимам гальванометра.

Перед включением установки в сеть ручку потенциометра ставят приблизительно на середину, включают на полную емкость батарею конденсаторов и всю обмотку дроссельной катушки. Через короткое время после включения выпрямителя в сеть, когда прогреются катоды ламп, генератор обычно начинает действовать. Период колебаний приблизительно равен 0,5 с. Если размах колебаний стрелки гальванометра недостаточно велик, увеличивают напряжение в анодной цепи, поворачивая ручку регулятора по часовой стрелке. Если колебания не возбуждаются, надо уменьшить емкость батареи конденсаторов и, как только колебания возникнут, снова увеличить емкость до максимальной величины.

В данной установке электрическая цепь имеет оголенные участки, поэтому при проведении опытов необходимо соблюдать осторожность.

Надо иметь в виду, что генератор может действовать только при определенным образом согласованном включении обмоток. Именно такое включение показано на схеме (рис. 1-49). Если в установке применяются катушки с неизвестным расположением выводов, то правильное включение находят путем проб, меняя местами провода на зажимах одной из катушек.

Выбранная здесь схема генератора незатухающих колебаний имеет широкое применение в радиотехнике и более других подходит для первоначального изучения действия генератора. Особенность этой схемы состоит в том, что колебательный контур в ней включен не в анодную цепь, а в цепь сетки и поэтому свободен от постоянной слагающей анодного тока. Такое включение значительно облегчает понимание работы генератора.

Для объяснения действия генератора пользуются схемой (рис. 1-49), на которой сердечник с обмотками изображают не условными обозначениями, а упрощенным рисунком, по которому можно проследить за направлениями токов и магнитных силовых линий в сердечнике.

Возможны два способа объяснения действия генератора. Первый состоит в постепенном прослеживании действия одних частей схемы на другие, начиная с момента замыкания анодной цепи и до конца периода колебания. Как показывает опыт, такой способ довольно труден для учащихся. Пользуясь вторым способом, указывают, что для получения незатухающих колебаний необходимо периодически возмещать необратимые потери энергии в

контуре, приводящие к затуханию. Для этого колебательный контур посредством катушки, включенной в анодную цепь, связан с источником энергии. Чтобы порции энергии, поступающие от источника, были своевременными, эта катушка определенным образом индуктивно связана с сеткой лампы, выполняющей роль электронного выключателя.

В процессе колебаний, совершающихся в колебательном контуре, происходит периодическое повышение и понижение потенциала сетки относительно катода. При повышении потенциала сетки анодный ток усиливается, а при понижении — ослабевает. Но в катушке колебательного контура при всяком изменении анодного тока индуцируется электрическое поле. Оно создает в катушке контура добавочную ЭДС, которая и восполняет потери энергии, если только направление индуцированного вихревого электрического поля совпадает с направлением тока в витках катушки.

Рассмотрим момент, когда ток в катушке контура направлен вверх. Очевидно, при этом потенциал сетки повышается и происходит усиление анодного тока. Если катушка обратной связи включена в анодную цепь, как показано на схеме, то создаваемое ею магнитное поле, как следует из правила Ленца, будет индуцировать в катушке контура электрическое поле, совпадающее по направлению с током и поддерживающее его.

В течение второй половины периода ток в катушке колебательного контура направлен вниз и потенциал сетки понижается. В катушке обратной связи ток ослабевает, и в катушке колебательного контура вновь индуцируется электрическое поле, также совпадающее по направлению с током в катушке контура.

Для возбуждения колебаний необходим достаточно сильный импульс анодного тока в катушке обратной связи, правильно связанной с катушкой колебательного контура. Этот импульс возникает в момент замыкания анодной цепи. Легко показать, что без такого импульса колебания могут и не возникнуть. Для этого во время действия генератора ручкой потенциометра уменьшают напряжение в анодной цепи до нуля, вследствие чего колебания прекращаются. Далее плавно и медленно вновь увеличивают анодный ток и показывают, что при этом колебания не возникают. Достаточно, однако, выключателем разомкнуть и вновь замкнуть анодную цепь, чтобы генератор сразу начал действовать. При этом надо заметить направление первоначального отброса стрелки.

Опыт повторяют, поменяв местами провода на зажимах катушки обратной связи. В этом случае при размыкании и последующем замыкании анодного тока заметен только единичный отброс стрелки гальванометра (в противоположную сторону), но колебания в контуре не возникают.

После выяснения принципа действия генератора показывают увеличение частоты колебаний при уменьшении емкости и индук-

тивности контура. При значительном увеличении частоты, когда сильная вибрация подвижной системы гальванометра может его повредить, гальванометр отключают, емкость конденсатора уменьшают до нуля и вместо гальванометра включают громкоговоритель. Громкоговоритель издает звук низкого тона. При сдвигании ярма сердечника тон повышается и может быть не только доведен до предела слышимости, но и перейти в область ультразвука.

ОПЫТ 24. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Оборудование: 1) радиоприемник детекторный демонстрационный, 2) генератор УВЧ, 3) выпрямитель ВУП, 4) лампа неоновая, 5) лампа люминесцентная, 6) провода соединительные с наконечниками.

Постепенный переход от медленных электрических колебаний к звуковым и ультразвуковым был показан в предыдущем опыте путем уменьшения емкости и индуктивности контура, как этого требует формула Томсона. Для демонстрации дальнейшей эволюции в конструкции колебательного контура при переходе ко все более высоким частотам надо показать колебательный контур радиоприемника (рис. 1-50), обращая внимание учащихся на конструкцию его катушки, конденсатора и сравнивая их с аналогичными частями колебательного контура предыдущей установки.

Надо указать, что собственную частоту этого контура можно изменять от 150 до 1500 кГц путем переключения обмоток катушки и поворота ручки конденсатора переменной емкости. Это частоты, применяемые в радиовещании, а сам колебательный контур является частью радиоприемника, опыты с которым будут проводиться позднее.

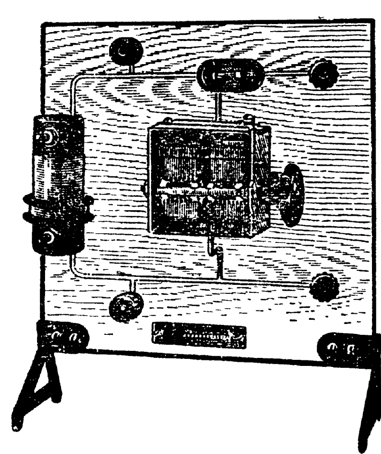


Рис. 1-50. Детекторный радиоприемник.

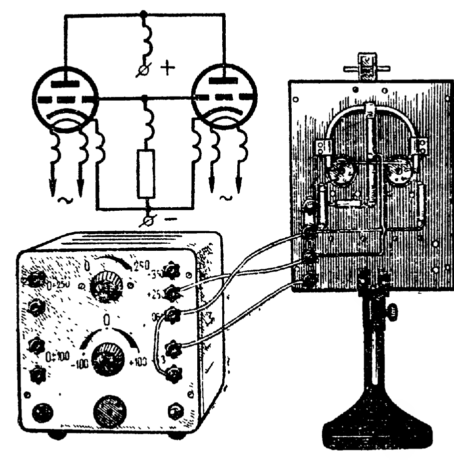


Рис. 1-51. Генератор УВЧ на частоту 150 МГц и его схема.

При переходе к еще большим частотам для колебательного контура может оказаться достаточной индуктивность одного витка, а роль конденсатора будут выполнять электроды лампы. Таков колебательный контур генератора ультравысокой частоты — УВЧ (рис. 1-51).

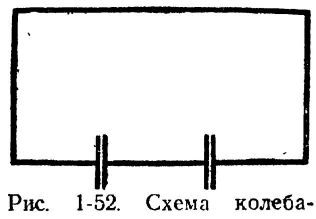


Рис. 1-52. Схема колебательного контура генератора.

Генератор показывают учащимся сначала стороной, где расположены два триода, затем поворачивают его и показывают колебательный контур, который состоит из проволочного витка, соединяющего аноды двух ламп, у которых сетки соединены между собой.

Таким образом, если рассматривать анод и сетку каждой лампы (рис. 1-51) как конденсатор, то таких конденсаторов в контуре генератора два и соединены они последовательно (рис. 1-52). Обе схемы вычерчивают на классной доске.

Затем соединяют генератор с выпрямителем и включают в сеть. Когда разогреются катоды ламп, генератор начинает действовать. Частота колебаний, возбуждаемых генератором,— $1{,}5 \cdot 10^8$ Гц. Разумеется, что при такой частоте ни гальванометр, ни громкоговоритель не могут непосредственно служить индикаторами колебаний. Чтобы обнаружить действие генератора, приближают к основанию контурного витка баллончик неоновой лампы и наблюдают, как она вспыхивает. Передвигая лампу вдоль контура, показывают, что она наиболее ярко светится у ламповых панелей и около баллонов ламп, где амплитуда напряженности переменного электрического поля высокой частоты наибольшая [1].

Рассмотрим действие генератора. Для этого представим себе, что после включения источника тока через две параллельные ветви, т. е. через две лампы, течет постоянный ток. Затем вследствие какой-либо незначительной причины в контуре генератора возникли слабые колебания и сетка левой лампы получила отрицательный заряд (см. рис. 1-51, схема). Тогда в левой ветви контура при ослаблении тока возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая ток, из-за чего анод левой лампы будет заряжаться положительно, что, в свою очередь, еще больше увеличит отрицательный заряд сетки, и левая лампа окажется запертой.

Наоборот, положительный заряд сетки правой лампы усилит анодный ток в правой ветви контура.

В следующий момент, когда потенциалы сеток станут выравниваться, ослабление тока в правой ветви контура вызовет появление ЭДС индукции, которая начнет увеличивать положи-

---

[1] Очень ярко светится люминесцентная лампа, если приближать ее к основаниям ламп генератора.

тельный заряд анода правой лампы, а заряд сетки станет отрицательным. Теперь запирается правая лампа, а через левую течет анодный ток максимальной величины.

Благодаря периодическим импульсам анодного тока аноды ламп каждый раз заряжаются до одного и того же потенциала, вследствие чего колебания не затухают.

Высокочастотные колебания в контуре генератора могли бы послужить причиной возникновения вынужденных колебаний в других частях схемы. Это вызвало бы большие потери энергии контура. Чтобы этого не случилось, колебательный контур отделен от остальных частей генератора дросселями, оказывающими значительное реактивное сопротивление току высокой частоты, но свободно пропускающими постоянный ток.

Проводя опыты с генератором УВЧ, не следует забывать, что действующий генератор является источником радиопомех. Поэтому включать генератор надо на короткое время и без надобности немедленно выключать.

ОПЫТ 25. РЕЗОНАНС КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Оборудование: 1) генератор УВЧ, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) контур настраивающийся, 4) электродвигатель с набором принадлежностей, 5) провода соединительные с наконечниками.

На расстоянии 10—15 см от генератора УВЧ устанавливают колебательный контур, состоящий из переменного конденсатора небольшой емкости, проволочного витка и лампы накаливания миниатюрной на 3,5 В и 0,28 А (рис. 1-53). Включают генератор и медленно поворачивают ручку конденсатора, при этом лампочка постепенно загорается и при дальнейшем вращении пластины конденсатора вновь гаснет.

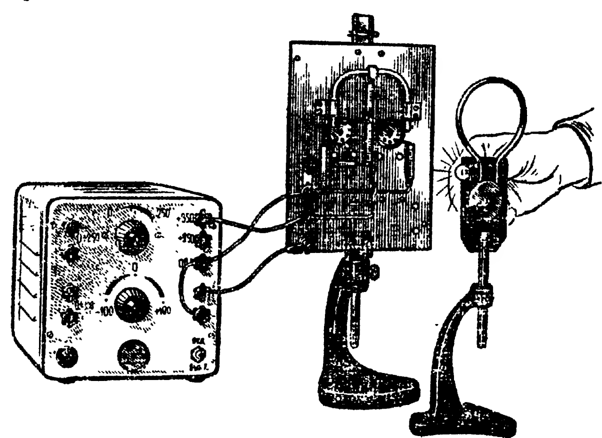


Рис. 1-53. Резонанс электрических колебательных контуров.

В этом опыте амплитуда вынужденных колебаний, возбуждаемых в колебательном контуре переменным магнитным полем генератора, увеличивается по мере приближения собственной частоты колебательного контура к частоте колебаний генератора. Когда частоты становятся равными, амплитуда колебаний достигает максимальной величины. Этот момент отмечается максимальной яркостью горения лампочки.

После этого опыта полезно продемонстрировать механическую аналогию наблюдаемого явления и повторить опыт 11 «Резонанс при работе электродвигателя». Показывают только ту часть опыта, где при постоянной скорости электродвигателя изменяют длину установленного на нем язычкового вибратора. В некоторый момент, когда собственная частота вибратора становится равной частоте импульсов, получаемых от электродвигателя, размах колебаний вибратора достигает максимума.

§ 3. ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ОПЫТ 26. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ВРАЩЕНИИ ВИТКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Оборудование: 1) прибор для демонстрации вращения рамки в магнитном поле, 2) магниты полосовые, 3) гальванометр от демонстрационного вольтметра, 4) провода соединительные с наконечниками, 5) подставки для магнитов (банки стеклянные консервные).

На рамке прибора, представленного на рисунке 1-54, устанавливают коллектор переменного тока, состоящий из двух колец. К кольцам подводят щетки до тесного соприкосновения. Коллек-

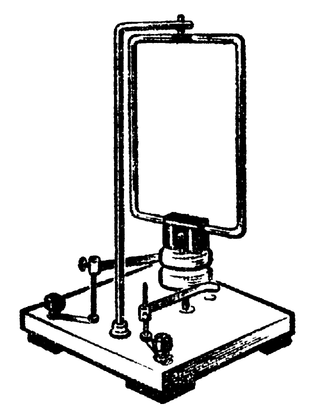


Рис 1-54. Прибор для демонстрации принципа действия генератора переменного тока.

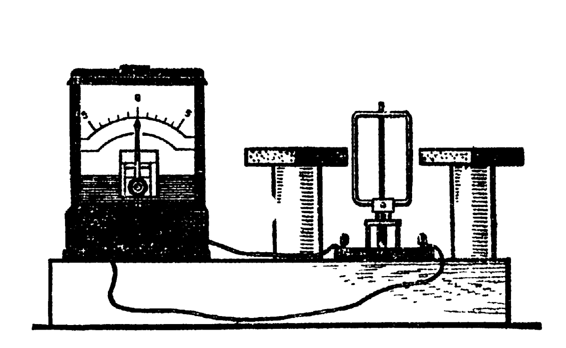


Рис. 1-55. Демонстрация принципа действия генератора.

тор и концы щеток должны быть предварительно почищены мелкой наждачной бумагой.

Разместив по обе стороны рамки полосовые магниты разноименными полюсами, как это показано на рисунке 1-55, соединяют зажимы прибора с зажимами низкоомной обмотки гальванометра. Медленно и равномерно поворачивают рукой рамку прибора и наблюдают, как стрелка гальванометра отклоняется поочередно то в правую, то в левую сторону от нуля шкалы, обнаруживая тем самым возникновение переменного тока.

Не меняя установки, ставят внутри рамки прибора железный стакан (пустую консервную банку) в качестве сердечника и показывают заметное увеличение силы тока [1].

Собранная для опыта установка и описанный опыт с ней служат основой для объяснения принципа действия генератора переменного тока.

ОПЫТ 27. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Оборудование: 1) электродвигатель однофазный, 2) трансформатор универсальный, 3) прибор для демонстрации вихревых токов или алюминиевый стакан от калориметра, стойка с острием и медная пластинка, 4) провода соединительные с наконечниками, 5) ящик-подставка.

Однофазный электродвигатель переменного тока, например, от маломощного вентилятора разбирают и показывают учащимся отдельно статор и ротор (рис. 1-56). Для выяснения принципа действия такого двигателя применяют следующую простую установку. На сердечник универсального трансформатора надевают катушку на 120/220 В и над нею зажимают ярмо, как показано на рисунке 1-57. Перед концом ярма устанавливают стойку с острием от демонстрационной магнитной стрелки, а на острие

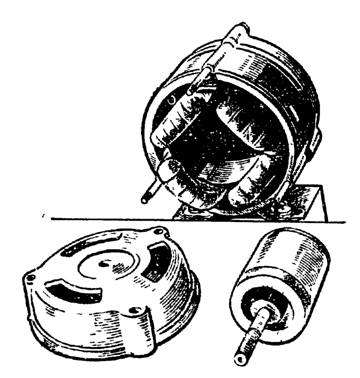


Рис. 1-56. Вентиляторный однофазный электродвигатель в разобранном виде.

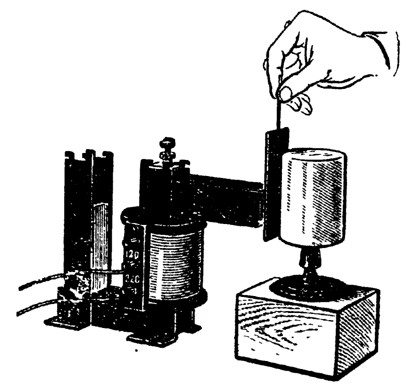


Рис. 1-57. Установка для демонстрации принципа действия однофазного электродвигателя.

[1] Для большей устойчивости банку надо закрепить на основании рамки пластилином.

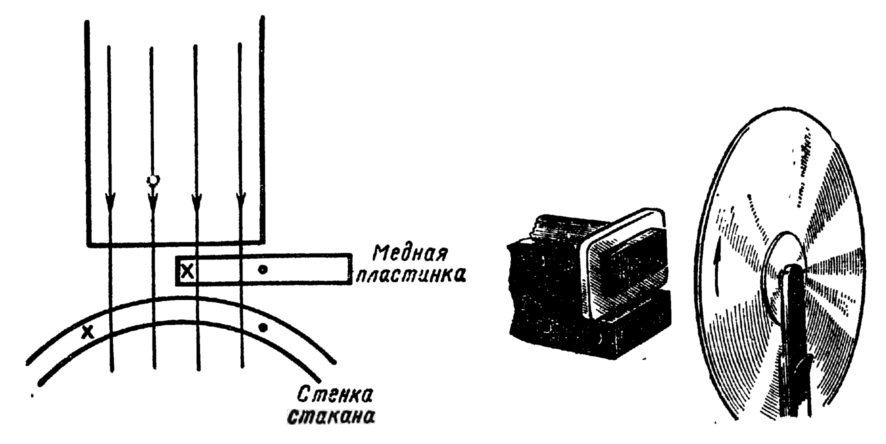


Рис. 1-58. К объяснению действия установки, изображенной на рисунке 1-57.

Рис. 1-59. Другая установка для демонстрации принципа действия однофазного электродвигателя.

путем нескольких проб точно по центру насаживают вверх дном алюминиевый стакан от калориметра. Затем к зажимам катушки подводят переменный ток соответствующего напряжения, а к торцу ярма прикладывают сбоку медную пластину (из набора по электролизу). Если перекрыть пластиной приблизительно половину торцевой поверхности ярма, то стакан начинает вращаться на острие в сторону пластины. Передвинув пластину на другую половину ярма, заставляют стакан вращаться в другую сторону.

Вращение стакана вызывается взаимодействием вихревых токов, возникающих в пластине и в стенке стакана, благодаря изменению пронизывающего их магнитного потока. На рисунке 1-58 изображены конец сердечника, прикрывающая его пластина и часть стенки стакана. Пусть изображенный на этом рисунке магнитный поток, создаваемый переменным током, убывает, а затем нарастает в противоположном направлении. В течение всего этого промежутка времени в пластине и в стенке стакана будут нарастать, а затем ослабевать вихревые токи. Направление этих токов можно определить по правилу Ленца. Как видно из рисунка, эти направления в любой момент одинаковы. Известно, что одинаково направленные токи притягиваются. Благодаря несимметричному их размещению создается вращающий момент и стакан начинает вращаться по часовой стрелке.

Более совершенная и близкая к конструкции электродвигателя установка изображена на рисунке 1-59.

В торце ярма универсального трансформатора поперек пластин прорезан паз шириной и глубиной по 8 мм и на один из образовавшихся выступов насажен толстый замкнутый медный виток. Этот виток можно заменить замкнутой на себя обмоткой из голой медной проволоки любого диаметра (лучше брать прово-

локу толще). Во вращение приводится специальный диск для опытов с вихревыми токами (см. Ч. 1, опыт 174). Действует эта установка аналогично описанной выше, но более эффективно.

ОПЫТ 28. ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КОЛЛЕКТОРОМ И С ПОМОЩЬЮ ДИОДОВ

Оборудование: 1) прибор для демонстрации вращения рамки с током в магнитном поле, 2) магниты полосовые, 3) машина магнитоэлектрическая, 4) гальванометр от демонстрационного вольтметра, 5) лампа накаливания миниатюрная МН 3,5 В; 0,28 А на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) подставка для магнитов.

На рамке прибора, изображенного на рисунке 1-54, коллектор переменного тока, состоящий из двух колец, заменяют коллектором, состоящим из двух полуколец. Прибор присоединяют к зажимам гальванометра и рамку равномерно вращают. Стрелка гальванометра толчками отклоняется от нулевого положения в одну сторону; следовательно, через гальванометр течет пульсирующий ток постоянного направления.

Этот прибор имеет весьма существенный недостаток: магнитный поток, охватываемый рамкой, слишком слаб. Более совершенной в этом отношении является магнитоэлектрическая машина. Она отличается по своему устройству от прежнего прибора главным образом тем, что в ней применен сильный магнит, снабженный полукруглыми наконечниками (башмаками). Кроме того, проволочная обмотка намотана на массивный железный якорь, усиливающий магнитное поле. Показывают действие прибора.

Для первого опыта с магнитоэлектрической машиной надо снять со шкива резиновый ремень и прикрепить самодельную проволочную рукоятку такой длины, чтобы с ее помощью можно было медленно и плавно поворачивать якорь. Такую рукоятку проще изготовить из медной проволоки диаметром 1—1,5 мм, которую можно гнуть руками, не пользуясь инструментом [1].

Зажимы машины присоединяют к зажимам гальванометра, щетки прижимают к кольцам и, медленно вращая с помощью рукоятки якорь машины, демонстрируют колебания стрелки гальванометра. При увеличении скорости вращения увеличивается частота колебания стрелки, уменьшение скорости влечет за собой уменьшение частоты.

Затем переставляют щетки и прижимают их к полукольцам. Повторяют опыт и при вращении якоря получают отклонение стрелки импульсами, но в одну сторону.

Снимают рукоятку и на шкив снова надевают ремень. К зажимам вольтметра для измерения постоянного напряжения до

[1] В последних выпусках магнитоэлектрической машины такую ручку выпускает промышленность.

5 В присоединяют зажимы машины с выпрямленным напряжением и приводят якорь машины во вращение. В зависимости от быстроты вращения якоря вольтметр показывает от 3 до 5 В, т. е. такое напряжение, какое требуется для нормального горения лампы.

Это подтверждают опытом, присоединив вместо вольтметра лампу, которая горит при работе машины нормальным накалом.

Выпрямление переменного тока полупроводниковым диодом подробно описано в ч. 1 этого пособия (опыт 160).

ОПЫТ 29. УСТРОЙСТВО И ДЕЙСТВИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Оборудование: 1) трансформатор универсальный, 2) амперметр с гальванометром демонстрационный, 3) вольтметр с гальванометром демонстрационный, 4) реостат ступенчатый демонстрационный, 5) регулятор напряжения РНШ, 6) лампа автомобильная А6-21, 7) выключатель однополюсный демонстрационный, 8) провода соединительные с наконечниками, 9) шнур с вилкой, 10) ящики-подставки.

Изучение трансформатора следует начать с демонстрации трансформаторов различного типа из имеющихся в физическом кабинете, показа изображения мощного трансформатора на таблице или диапозитиве. Затем, воспользовавшись разборным универсальным трансформатором, показать две его обмотки и сердечник, обратив внимание на особенность в устройстве сердечника.

Демонстрируют назначение трансформатора на примерах.

Показывают повышение напряжения. К зажимам источника переменного тока с регулятором напряжения подключают лампу на 6 В и вольтметр, настроенный на измерение переменного напряжения до 15 В. Регулятором доводят напряжение до 6 В и демонстрируют горение лампы в нормальном для нее режиме.

Далее заменяют шестивольтовую лампу бытовой на 127 В и убеждаются, что для ее горения напряжения источника недостаточно.

На место лампы включают обмотку универсального трансформатора с обозначением «6», а к зажимам второй обмотки с обозначением «120» подключают лампу. В новых условиях нить лампы накаливается нормально.

Заменяют лампу на 127 В лампой на 220 В. Будучи подключена к тем же зажимам, лампа не загорается или нить ее накаливается слабо. При переключении на зажимы «220» лампа горит нормально.

Далее создают положение, при котором возникает необходимость понизить напряжение. Вольтметр, настроенный на измерение напряжения до 250 В, подключают к зажимам источника тока и регулятором доводят напряжение до 220 В. Подключив к этим же зажимам обмотку трансформатора «220», а к зажимам

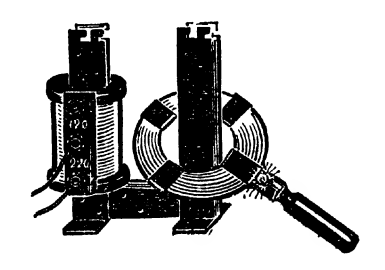


Рис. 1-60. Демонстрация индуктивной связи двух катушек.

обмотки «6» — шестивольтовую лампу, демонстрируют ее нормальное свечение.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Чтобы это показать, на незамкнутый сердечник универсального трансформатора надевают катушку «120—220» и одну из ее обмоток присоединяют к зажимам регулятора напряжения, рукоятка которого поставлена на нуль. На свободную часть сердечника надевают плоскую катушку, прилагаемую к универсальному трансформатору, замкнутую на лампу (рис. 1-60).

Включают регулятор напряжения в сеть и увеличивают напряжение, чтобы нить лампы получила нормальный накал. Снимая катушку с лампой и вновь надевая ее на сердечник, показывают, что ярче всего лампа горит, когда катушка опущена вниз и охватывает весь переменный магнитный поток. По мере перемещения катушки вверх все большая часть магнитного потока рассеивается и часть его, охваченная катушкой, уменьшается. Накал лампы ослабевает.

Далее опускают катушку вниз и, несколько снизив напряжение, уменьшают накал лампы. При замыкании сердечника ярмом накал лампы резко увеличивается. Объясняется это тем, что магнитный поток усилился и теперь почти весь заключен в сердечнике. При перемещении катушки с лампой яркость последней уже не изменяется.

Проводя этот опыт, необходимо обратить внимание учащихся, что обе катушки электрически изолированы друг от друга и связаны только переменным магнитным полем: переменный ток в первичной катушке создает переменный магнитный поток в сердечнике. Вокруг последнего образуется переменное вихревое электрическое поле, которое и является причиной возникновения переменного тока во вторичной катушке, когда она замкнута.

Проверим зависимость числа витков от напряжения в катушках трансформатора. Воспользуемся следующими паспортными данными универсального трансформатора: катушка с обозначением «220» имеет 912 витков провода, часть этой обмотки с обозначением «120» — 490 витков; вторая катушка состоит из 76 витков и имеет вывод от середины обмотки на средний зажим, каждая ее секция имеет обозначение «6».

Установку для демонстрации собирают, как показано на рисунке 1-61. В этой установке первичной обмоткой трансформатора служит обмотка из 912 витков («220»). Она подключена через амперметр, настроенный на измерение силы переменного тока до 5 А, к регулятору напряжения, от которого на ее зажимы подает-

ся напряжение 220 В. К крайним зажимам вторичной обмотки «6+6» присоединен демонстрационный вольтметр, настроенный на измерение переменного напряжения до 15 В, и, в качестве нагрузки, ступенчатый реостат сопротивлением 10 Ом. Пока реостат не включен, сила тока в первичной обмотке очень мала и стрелка амперметра едва отклоняется.

Учащимся известно, что соотношение

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$$

справедливо для идеального случая, когда активное сопротивление обмоток равно нулю, весь магнитный поток полностью замкнут в сердечнике и в последнем отсутствуют вихревые токи.

Определим, каким должно быть напряжение на зажимах вторичной обмотки ненагруженного трансформатора:

$$U_2=\frac{U_1 n_2}{n_1};\quad U_2=\frac{220\cdot 76}{912}\approx 18\ (\text{В}).$$

Вольтметр, подключенный к зажимам вторичной обмотки, показывает приблизительно 13 В, т. е. пониженное напряжение. Это расхождение объясняется наличием небольшого активного сопротивления в первичной цепи, некоторым рассеянием магнитного потока, вызванным главным образом наличием зазоров на двух стыках сердечника, а также небольшими вихревыми токами в железе сердечника, создающими некоторую неучтенную нагрузку.

При включении реостата и уменьшении его сопротивления до 5 Ом напряжение на зажимах вторичной обмотки уменьшается до 12,5 В. При дальнейшем уменьшении сопротивления на-

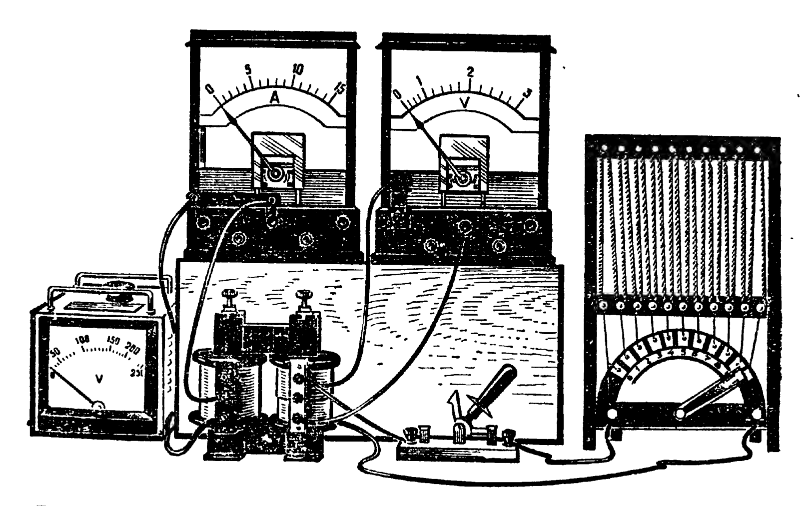


Рис. 1-61. Установка для демонстрации зависимости числа витков от напряжения в катушках трансформатора.

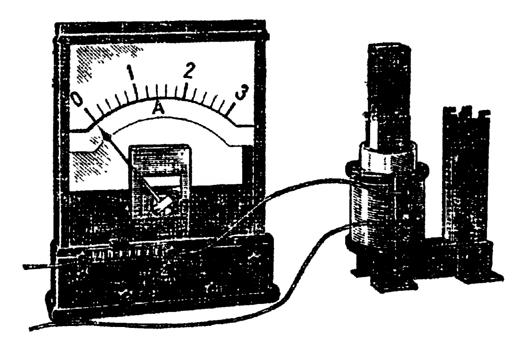


Рис. 1-62. Демонстрация сбрасывания кольца.

пряжение продолжает уменьшаться и одновременно возрастает сила тока в первичной цепи. При коротком замыкании вторичной обмотки сила тока достигает 1,2 А. Таким образом, учащиеся убеждаются, что потребление энергии первичной обмоткой трансформатора определяется отдачей энергии во вторичную цепь.

При анализе этого явления выясняют фазовые соотношения между колебаниями токов и напряжений. Устанавливают, что токи в первичной и вторичной цепях нагруженного трансформатора отличаются по фазе почти на 180°. Это подтверждают следующим опытом. Из предыдущей установки удаляют реостат и вторичную катушку. Ярмо от сердечника ставят вертикально над оставшейся катушкой и надевают на него алюминиевое кольцо (рис. 1-62). При включении тока кольцо резко подбрасывается и слетает с ярма. Надетое вновь кольцо висит, удерживаясь на некоторой высоте.

Продолжая опыт, предлагают одному из учащихся опустить кольцо и удерживать его у катушки. При этом наблюдается усиление тока с 2 А почти до 3 А, а через короткое время обнаруживается, что экспериментатор не может удерживать кольцо и сообщает о его сильном нагревании.

Полученные результаты приводят учащихся к заключению, что индукционный ток в кольце довольно велик и направлен противоположно току в катушке (токи противоположно направленные отталкиваются). Этот индукционный ток создает в сердечнике переменный магнитный поток, направленный противоположно потоку, создаваемому основным током в катушке, вследствие этого ЭДС самоиндукции в катушке уменьшается, что влечет за собой уменьшение ее индуктивности и усиление тока.

ОПЫТ 30. ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Оборудование: 1) трансформатор универсальный, 2) трансформаторы на панелях — 1 пара, 3) машина магнитоэлектрическая, 4) самодельные добавочные детали для сборки модели звонка, 5) штативы изолирующие, 6) лампа накаливания миниатюрная МН 3,5 В; 0,28 А на подставке, 7) гвозди 50 мм — 2 шт., 8) выключатель однополюсный демонстрационный, 9) провода соединительные с наконечниками.

1. Наиболее важное применение трансформатора — это передача электрической энергии на большие расстояния. Для демонстрации системы «генератор — линия электропередачи

(ЛЭП) — потребитель» собирают ее модель. К зажимам магнитоэлектрической машины со щетками, установленными для получения переменного напряжения, присоединяют указанную выше лампу. При вращении якоря машины лампа ярко загорается. Электрическая энергия, вырабатываемая машиной, в этом случае почти вся идет на накаливание нити лампы и только небольшая ее часть бесполезно тратится на нагревание обмотки якоря.

Иначе обстоит дело, когда электростанция находится от потребителя на большом расстоянии.

Лампу отодвигают от генератора на другой конец демонстрационного стола и соединяют с генератором двумя проводами сопротивлением по 30 Ом. Для этого могут быть взяты две нихромовые спирали для электроплитки или два куска любого тонкого провода с большим удельным сопротивлением, причем линию передачи натягивают между двумя изолирующими штативами вдоль демонстрационного стола.

Теперь при самом быстром вращении якоря машины нить лампы накаливается едва заметно (именно с таким расчетом и подбирают для опыта сопротивление линии передачи). Лампа горит плохо потому, что к ее сопротивлению добавилось сопротивление линии, подводящей ток.

После этого начало и конец линии передачи присоединяют к высоковольтным обмоткам двух трансформаторов, а низковольтные обмотки присоединяют к зажимам машины с одной стороны и к зажимам лампы — с другой (рис. 1-63). Таким образом, линия передачи осталась прежней, тем не менее при вращении якоря машины лампа вновь горит почти полным накалом.

Благодаря повышающему трансформатору энергия, необходимая для питания лампы, передается под напряжением 120 В, т. е. под напряжением, увеличенным в тридцать раз. Следовательно, при той же мощности сила тока в проводах линии должна быть в тридцать раз меньше, а потеря мощности в них уменьшается в девятьсот раз, как это видно из формулы

$$P = I^2R.$$

2. Большое практическое применение трансформатор находит в электросварке. Модель сварочного трансформатора собирают из деталей универсального трансформатора (рис. 1-64). В качестве первичной обмотки берут катушку «120—220», вторичной

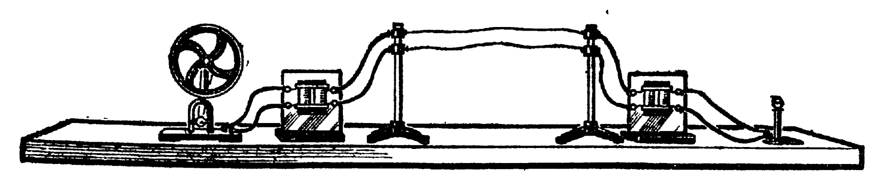


Рис. 1-63. Демонстрация передачи электроэнергии на расстояние.

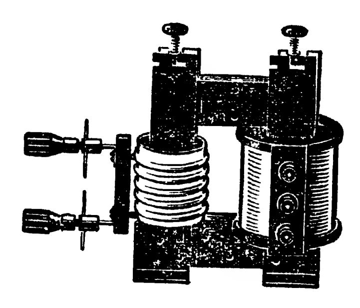


Рис. 1-64. Трансформатор универсальный с приспособлением для электросварки.

обмоткой служит спираль из пяти витков толстой медной шины с двумя специальными ручками-зажимами на концах.

Для демонстрации действия сварочного трансформатора в зажимы спирали зажимают два стальных гвоздя так, чтобы их острые концы расположились друг против друга. Затем при помощи шнура с вилкой подают на зажимы «120» первичной обмотки переменное напряжение не 120, а 220 В. При таком несколько форсированном режиме заметного нагревания обмотки не происходит. Взявшись за ручки сварочной спирали, сводят гвозди до соприкосновения и удерживают, слегка сжимая, пока концы гвоздей не накалятся добела. В последний момент их сжимают сильнее и выключают ток. Освободив гвозди из зажимов, показывают, что гвозди соединились.

Ручки спирали удобнее держать двумя руками. Поэтому во время опыта желательно иметь помощника, который в нужный момент должен выключить ток.

Следует заметить, что мощность универсального трансформатора недостаточно велика, чтобы сварка была прочной: в месте сварки гвозди из-за образования окалины легко разламываются.

Для успеха опыта необходимо, чтобы все сопротивление вторичной цепи было сосредоточено в месте касания двух гвоздей. Сопротивление всех остальных частей и мест их соединения должно быть ничтожно малым.

3. Образование двух противоположных магнитных потоков в сердечнике полностью нагруженного трансформатора положе-

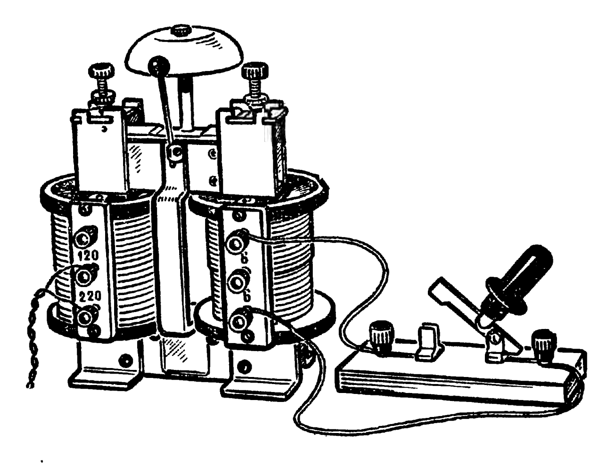
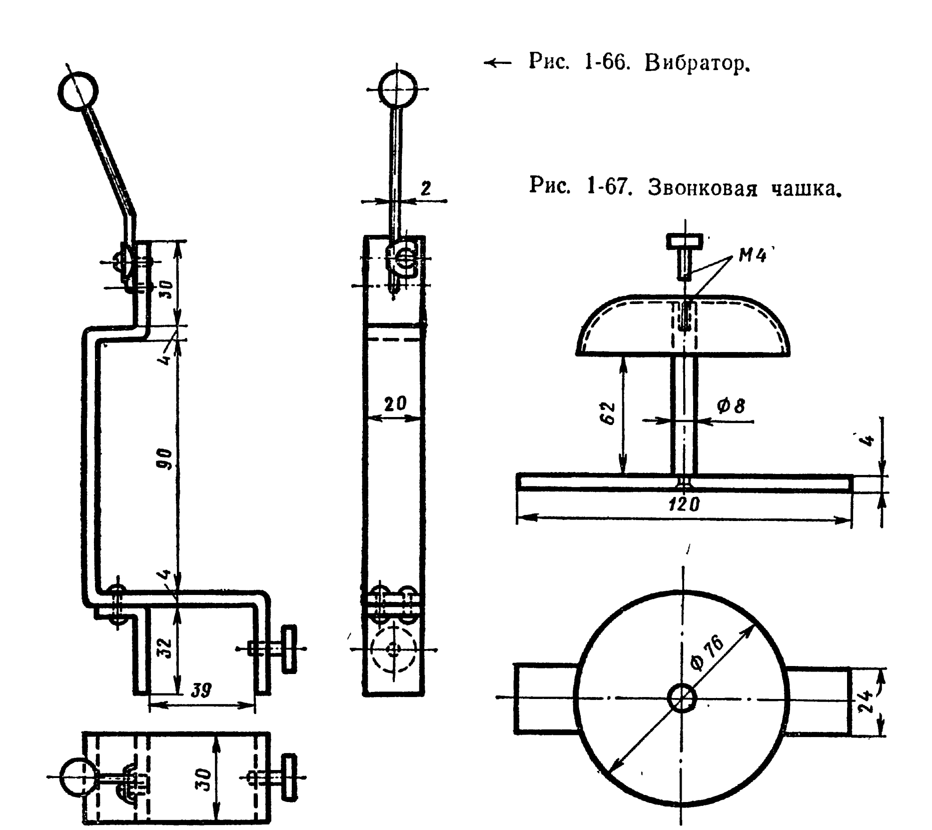


Рис. 1-€5. Демонстрационная модель звонка переменного тока.



← Рис. 1-66. Вибратор.

Рис. 1-67. Звонковая чашка.

но в основу устройства современного бытового электрического звонка переменного тока. Действующую демонстрационную модель такого звонка, изображенную на рисунке 1-65, легко собрать из универсального трансформатора и двух самодельных деталей: вибратора с бойком и стойки со звонковой чашкой.

Устройство и размеры этих деталей показаны на рисунках 1-66 и 1-67. Детали надо изготовить из мягкой стали и окрасить в яркие цвета так, чтобы они хорошо выделялись на фоне сердечника.

При сборке модели вибратор насаживают на основание сердечника и зажимают винтом. Затем на сердечник надевают катушки и сердечник замыкают ярмом. Поверх ярма устанавливают стойку со звонковой чашкой; пластину, которая служит ее основанием, зажимают винтами вместе с ярмом.

Для нормальной работы модели необходимо отрегулировать зазоры между верхним концом вибратора и ярмом, между бойком и звонковой чашкой. Первый зазор подгоняют один раз при изготовлении вибратора. Величина зазора — 2—3 мм. Второй зазор регулируют во время действия звонка передвижением основания стойки и поворотом звонковой чашки. Обычно для этой

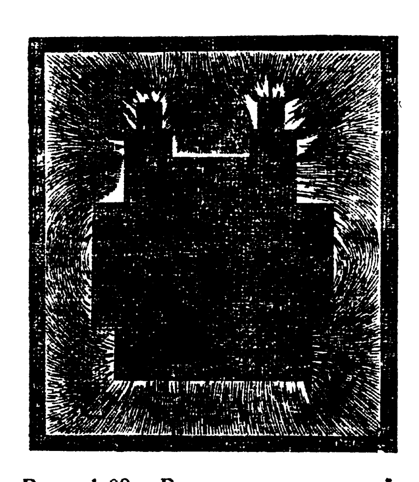


Рис. 1-68. Расположение линий индукции переменного магнитного поля вокруг сердечника трансформатора с замкнутой вторичной обмоткой.

цели отверстие в ней несколько смещено от центра.

Для демонстрации действия звонка зажимы первичной катушки присоединяют к сети переменного тока соответствующего напряжения, а крайние зажимы низковольтной катушки присоединяют к ключу, который будет выполнять роль звонковой кнопки. При замыкании ключа звонок звонит.

Действие звонка объясняют следующим образом. Пока вторичная обмотка не замкнута, переменным током первичной обмотки в сердечнике возбуждается переменный магнитный поток, почти полностью замкнутый внутри сердечника. При замыкании вторичной обмотки накоротко в ней возникает переменный ток. Токи в первичной и вторичной обмотках противоположны по фазе, и в сердечнике происходит такое перераспределение магнитного потока, при котором он уже не замкнут внутри сердечника, а образует две параллельные ветви с выходом в окружающее пространство. Вибратор, прикрепленный к сердечнику, оказывается теперь в переменном магнитном поле, которое и приводит его в колебательное движение.

На рисунке 1-68 показан магнитный спектр переменного магнитного поля вокруг сердечника трансформатора с замкнутой вторичной обмоткой, полученный с помощью железных опилок. Чтобы получить такой спектр, надо в листе плотной бумаги вырезать отверстие по форме трансформатора, погрузить ее на короткое время в кювету с расплавленным парафином и дать избытку парафина стечь. Затем положить трансформатор горизонтально и наложить подготовленный лист. Чтобы края листа не обвисали, под них надо подложить подходящие по высоте одинаковые деревянные или картонные подставки.

Насыпав на бумагу с помощью ситечка равномерный слой железных опилок, включают в первичную обмотку переменный ток и замыкают зажимы вторичной обмотки. При этом образуется спектр. Если он недостаточно отчетлив, можно слегка постучать карандашом по бумаге. После выключения тока надо включить небольшую электроплитку, повернуть ее спиралью вниз и облучить последовательно все участки спектра. Тонкий слой парафина, расплавляясь и снова застывая, закрепляет опилки на бумаге. После этого закрепленный спектр можно снять и показать учащимся.

§ 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

Большинство опытов, описанных в этом параграфе, демонстрируют с помощью волновой машины, ванны для проецирования волн, звукового и ультразвукового генераторов, электронного осциллографа, усилителя низкой частоты и других современных электронных приборов. Устройства многих из них описаны в книге «Учебное оборудование по физике в средней школе» (под. ред. А. А. Покровского. М., «Просвещение», 1973). Поэтому здесь описан лишь ультразвуковой генератор УД-1, который не включен в указанное пособие. Сведения о других приборах и приспособлениях приведены далее в описаниях опытов.

Ультразвуковой генератор типа УД-1 (рис. 1-69) собран по двухтактной схеме с автотрансформаторной обратной связью на лампах 6П3С, работающих в триодном режиме.

Колебательный контур состоит из конденсатора переменной емкости C_1 и катушки индуктивности L_1. Катушка намотана проводом ММ-1,56 и содержит 14 витков. От середины катушки сделан отвод для подачи напряжения на аноды ламп. В цепь питания включен высокочастотный дроссель *Др*, содержащий 300 витков провода ПЭВ-2, уложенного секциями в пазах изолирующего каркаса.

На аноды ламп подается переменное напряжение непосредственно от силового трансформатора, в результате чего генератор работает в импульсном режиме с частотой импульсов 50 Гц.

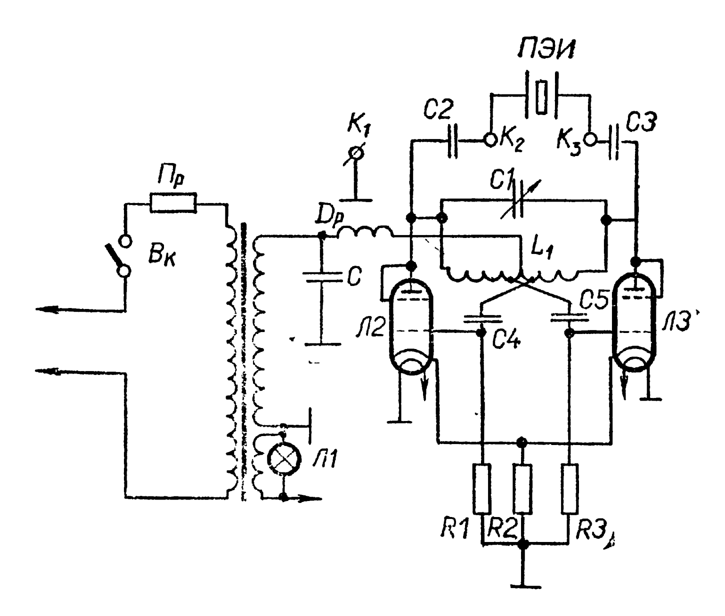
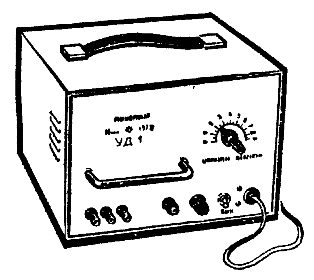


Рис. 1-69. Схема ультразвукового генератора.



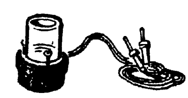


Рис. 1-70. Ультразвуковой генератор УД-1.

В цепь катодов ламп включен проволочный резистор R_2 сопротивлением 510 Ом, рассчитанный на мощность 10—15 Вт. С помощью этого резистора на сетки ламп подается постоянное отрицательное напряжение смещения, благодаря чему увеличивается выходная мощность генератора.

Параллельно контуру, через разделительные высоковольтные конденсаторы C_2 и C_3, включается пьезоэлектрический излучатель ультразвука, показанный на схеме.

Генератор смонтирован в металлическом футляре размером 264×255×261 мм (рис. 1-70). На лицевой стороне панели расположены: ручка «Подстройка частоты», тумблер, предохранитель и шнур с двухполюсной вилкой для включения прибора в сеть, индикаторная лампочка, две клеммы «Выход УЗЧ» для подключения излучателя, клемма «Земля».

Генератор устойчиво работает на частоте 2640 кГц и питается от сети переменного тока напряжением 220 В.

К прибору прилагается пьезоэлектрический излучатель и небольшая цилиндрическая ванночка.

Чтобы с этим генератором можно было показать все перечисленные далее опыты, надо переделать излучатель и изготовить несколько простых деталей. Ниже дано их описание.

Излучатель ультразвука (рис. 1-71) состоит из пьезокерамической пластинки *1* диаметром 30 мм и толщиной 1,8 мм и держателя *2* с тонкой алюминиевой крышкой *3*. Держатель представляет собой цилиндр с внешним диаметром 53 мм и высотой 18 мм, выточенный из органического стекла. На верхний конец цилиндра надет латунный ободок с винтовой нарезкой для алюминиевой крышки. В торце цилиндра выточено углубление диаметром 20 мм и глубиной 10 мм для пьезопластинки. На дне это-

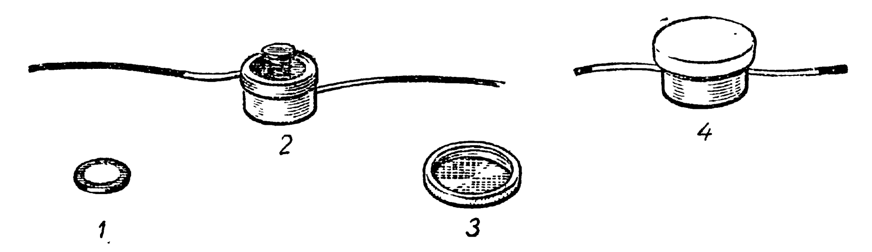


Рис. 1-71. Излучатель ультразвука:
1 — пьезокерамическая пластинка; *2* — держатель пластинки; *3* — алюминиевая крышка держателя; *4* — излучатель в собранном виде.

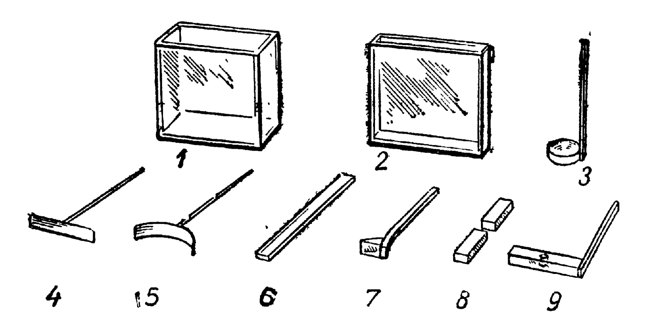


Рис. 1-72. Комплект деталей к ультразвуковому генератору:

1 — кювета прямоугольная; *2* — кювета с плоскопараллельными стенками; *3* — линза плоско-вогнутая; *4* — пластинка; *5* — пластинка дугообразная; *6* — пластинка плоскопараллельная; *7* — призма; *8* — пластинки из пенопласта; *9* — пластинки с поперечным отверстием.

го углубления сделано второе углубление диаметром 10 мм для спиральной пружины, которая прижимает пьезопластинку к алюминиевой крышке. К верхнему концу пружины припаян латунный диск диаметром 10 мм, а к нижнему концу — подводящий провод, который введен в цилиндр через боковое отверстие. Таким образом, электрические выводы от пьезопластинки осуществляются сверху через крышку и ободок, к которому припаян второй провод, а снизу — через латунный диск и спиральную пружину. Давление пружины на пьезопластинку регулируется с помощью поворота крышки.

Достоинство держателя такой конструкции состоит в том, что он позволяет вводить ультразвук как в твердое тело, так и в жидкость, при этом ультразвуковые волны излучаются только в одну сторону благодаря отражению их от слоя воздуха, находящегося внутри держателя под пьезопластинкой. В результате этого интенсивность излучения приблизительно удваивается.

В *комплект деталей к генератору* (рис. 1-72) входят: кювета *1* прямоугольной формы из органического стекла с внутренним размером 80×80×40 мм; кювета *2* с плоскопараллельными стенками и тонким дном из органического стекла размером 80×80×10 мм; плоско-вогнутая линза *3* диаметром 30 мм и радиусом кривизны 25 мм, выточенная из органического стекла; металлическая пластинка *4* размером 40×9×0,5 мм; металлическая дугообразная пластинка *5* такого же размера; пластинка *6* из органического стекла размером 120×9×3 мм; призма *7* из органического стекла размером 20×9×7 мм; две пластинки *8* из пенопласта толщиной 5 мм; пластинка *9* из органического стекла размером 40×9×5 мм с поперечным отверстием диаметром 4 мм.

ОПЫТ 31. ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

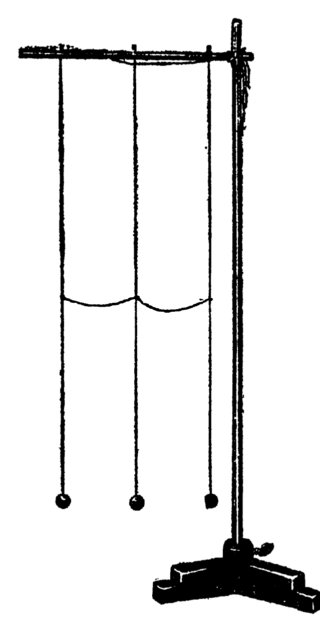
Оборудование: 1) стержень с тремя маятниками, 2) машина волновая, 3) штатив универсальный, 4) трубка резиновая или шнур диаметром до 1 см и длиной 4—5 м, 5) шнур резиновый диаметром 1—1,5 мм и длиной 50—60 см, 6) кинофильм «Колебания и волны», ч. II, 7) кинопроектор.

Изучение волновых процессов удобно начать с демонстрации колебания связанных маятников.

Маятники уравнивают по длине и связывают примерно в середине тонким резиновым шнуром (рис. 1-73).

Крайний маятник отклоняют от положения равновесия в плоскости, перпендикулярной горизонтальному стержню, и отпускают. Благодаря связи он через некоторое время раскачает второй шарик, а затем и третий. Показывают, что скорость передачи колебания от одного маятника к другому зависит от связи между маятниками. Для этого резиновый шнур опускают ближе к шарикам и снова повторяют опыт. Теперь процесс передачи колебаний происходит быстрее.

Напомнив учащимся, что частицы любого тела связаны между собой силами молекулярного сцепления, приходят к выводу, что колебания, возбужденные в одном месте тела, должны распространяться по всему телу. Этот вывод подкрепляют демонстрацией волн на резиновой трубке.


Рис. 1-73. Связанные маятники.

Длинную резиновую трубку привязывают одним концом к ручке оконной рамы или к крюку, ввернутому в стену около демонстрационного стола; свободный конец берут в руку и слегка натягивают поперек класса. По спокойной трубке ударяют рукой на расстоянии 20—30 см от конца. Образовавшийся изгиб сравнительно медленно перемещается по трубке и, дойдя до закрепленного конца, возвращается обратно. Удары повторяют несколько раз, фиксируя внимание учащихся лишь на волне, бегущей в прямом направлении.

Начальный импульс трубке можно сообщить иначе: захватывают конец трубки большим и указательным пальцами свободной руки, быстро оттягивают вниз на расстояние 3—5 см и отпускают или быстро встряхивают конец трубки рукой.

В процессе демонстрации опыта выясняют, что: 1) отдельные точки трубки колеблются в направлении, перпендику-

лярном распространению волны; 2) чем дальше точки расположены от источника колебаний, тем позднее приходят они в колебательное движение.

Процесс распространения колебаний в упругой среде называют волновым движением, а направление распространения колебаний — лучом.

Показывают, что скорость распространения волны зависит от величины силы сцепления между частицами среды, т. е. от упругих свойств среды. Для этого увеличивают натяжение резиновой трубки и снова возбуждают отдельные волновые импульсы. Убеждаются, что скорость распространения волны тем больше, чем сильнее натянута трубка.

После этого переходят к детальному выяснению механизма образования поперечных волн, пользуясь при этом волновой машиной.

Диск машины приводят в положение, при котором шарики оказываются опущенными к нижней планке. Затем с помощью муфт шарики поднимают и устанавливают на уровне белой черты, проведенной на щитке. Учащимся сообщают, что шарики машины моделируют отдельные частицы резинового шнура. Начальное их положение соответствует положению равновесия шнура.

Далее, переставляя шарики с помощью муфт, показывают расположение частиц среды при образовании и распространении поперечной волны.

Демонстрацию опыта сопровождают примерно следующим рассуждением.

Пусть на первую частицу подействовала кратковременная сила, направленная вверх. Под действием этой силы частица приходит в колебательное движение. Благодаря наличию связи между частицами среды вслед за первой частицей с некоторым опозданием начнет двигаться вверх вторая, за ней третья и т. д. Через $\frac{1}{4}T$ первая частица достигнет наибольшего отклонения от положения равновесия и остановится, а остальные частицы, вовлеченные за это время в движение, расположатся по синусоиде (рис. 1-74, *а*).

После этого первая частица под действием силы упругости начинает двигаться вниз к положению равновесия и достигнет его через $\frac{1}{2}T$. За это время еще несколько (три) частиц вовлекутся в колебательное движение, причем вторая и третья частицы после достижения наибольшего отклонения изменят свое движение на обратное. К концу второй четверти периода в крайнем верхнем положении окажется четвертая частица, остальные расположатся, как показано на рисунке 1-74, *б*.

Продолжая подобные рассуждения и одновременно перемещая шарики на спицах, показывают их расположение в конце

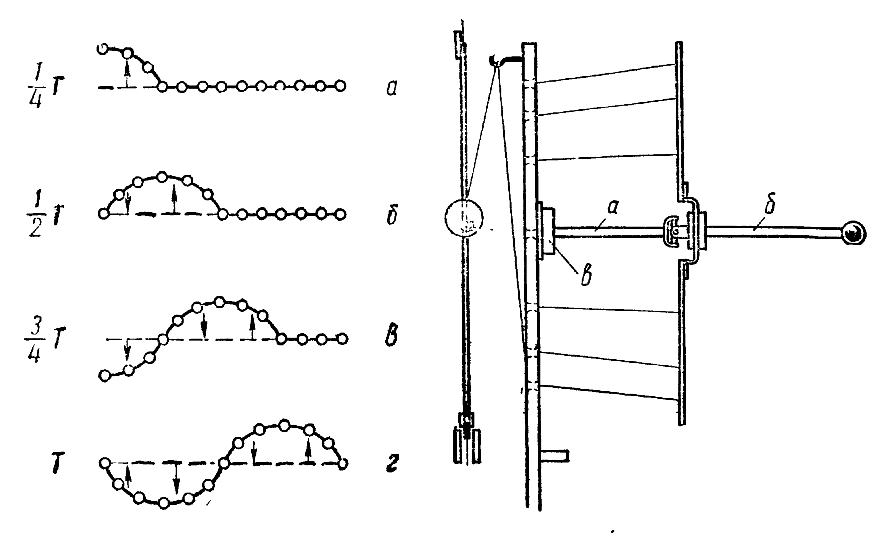


Рис 1-74. Положение шариков на волновой машине в различные моменты времени.

Рис. 1-75. Установка диска на волновой машине для демонстрации поперечных волн.

$\frac{3}{4}T$ (рис. 1-74, *в*) и в конце полного периода колебания первой частицы (рис. 1-74, *г*).

После этого диск волновой машины устанавливают для демонстрации поперечных волн (рис. 1-75). Для этого стержень *а* с шарниром ввинчивают в металлическое гнездо *в*, прикрепленное к щитку. Диск же оттягивают от щитка и насаживают центральным отверстием на винт шарнира, на который затем навинчивают рукоятку *б*. При таком положении диска все шарики поднимаются на уровень белой линии, имеющейся на лицевой стороне щитка. (При этом муфты на спицах должны быть опущены.) Рукой вращают рукоятку *б* так, чтобы она описывала боковую поверхность конуса. При этом возникает непрерывный процесс распространения поперечной волны (рис. 1-76).

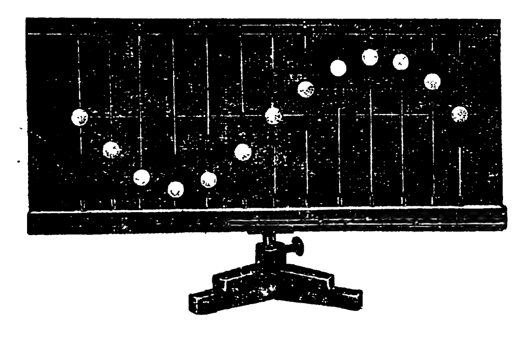


Рис. 1-76. Модель поперечной волны на волновой машине.

От направления вращения зависит направление распространения волн, а от скорости вращения — скорость распространения волн. Чтобы увеличить амплитуду колебаний, увеличивают радиус вращения рукоятки.

В процессе демонстрации обращают внимание на два различных явления: колебательное движение частиц и распространение колебательного движения. Оба эти движения взаимно перпендикулярны. Поэтому волны, в которых частицы среды колеблются перпендикулярно распространению волн, называют поперечными.

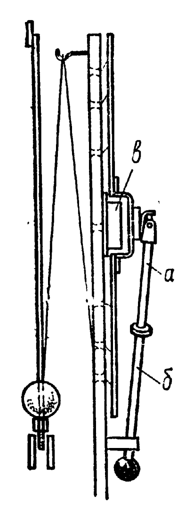
На опыте показывают, что за время полного колебания любой из частиц (период) колебательное движение распространяется на расстояние, равное длине волны.

Обращают также внимание на разность фаз колебаний отдельных частиц и дают понятие о длине волны как о расстоянии между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе.

Процесс образования продольной волны вначале показывают также на опыте со связанными маятниками (см. рис. 1-73). Для этого первый шарик отклоняют от положения равновесия в плоскости, проходящей через нити маятников, и, отпустив, наблюдают, как последовательно раскачиваются второй и третий шарики.

Представление о продольной волне создают с помощью волновой машины. Для этого диск машины устанавливают в положение, изображенное на рисунке 1-77. В этом случае шарики опускаются к нижней планке прибора. Взявшись за ручку нитяного зажима, вращают ее по окружности, начерченной на щитке. При этом маятники с шариками совершают колебательное движение и создают картину распространения продольных волн (рис. 1-78).

В продольной волне так же, как и в поперечной, частицы колеблются с одинаковым периодом и амплитудой и каждая последующая отстает от предыдущей по фазе. Различаются эти два вида волн лишь направлением колебания частиц. В продольной



←Рис. 1-77. Установка диска на волновой машине для демонстрации продольных волн.

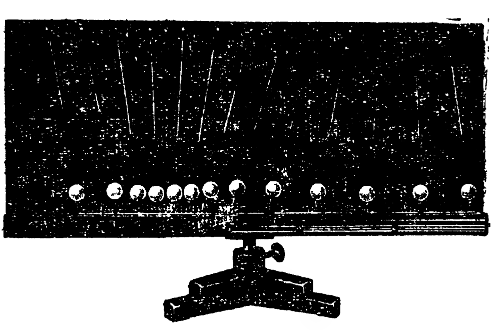


Рис. 1-78. Модель продольной волны на волновой машине.

волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Вследствие этого частицы среды то сближаются, то удаляются друг от друга; процесс распространения продольной волны сопровождается перемещением областей сгущения и разрежения.

Изменяя скорость вращения нитяного зажима, демонстрируют изменение скорости распространения волны. Показывают, что при изменении вращения зажима изменяется направление распространения волн, а при увеличении радиуса вращения увеличивается амплитуда колебания частиц.

Обращают внимание также на то, что точки, отстоящие друг от друга на расстоянии волны, имеют одинаковые фазы.

Для закрепления материала учащимся демонстрируют шестой фрагмент из учебного звукового кинофильма «Колебания и волны» (ч. II). В этом фрагменте, называемом «Распространение колебаний», вначале показывается колебание нитяных маятников, а затем раскрывается процесс образования поперечных и продольных волн. Показываются волны на поверхности воды. Поплавки на воде наглядно доказывают колебание частиц воды; при распространении волн они совершают лишь вертикальные колебания, но не перемещаются вдоль направления распространения волн.

ОПЫТ 32. ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Оборудование: 1) ванна для проецирования волн, 2) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 3) электродвигатель со стробоскопическим диском, 4) реостат сопротивлением 600 Ом или регулятор напряжения РНШ, 5) экран, 6) штатив универсальный.

Волны на поверхности воды, как известно, нельзя отнести точно к поперечным. Несмотря на это, они очень удобны для изучения многих закономерностей волнового движения. Для демонстрации пользуются ванной для проецирования волн с прозрачным или зеркальным дном; опыты проводят в затемненном классе.

В ванну наливают воды слоем 4—5 мм и уравнительными винтами устанавливают ее горизонтально. Если применяют ванну с зеркальным дном, то осветитель для теневого проецирования располагают на столе рядом с ванной так, чтобы вся поверхность воды была освещена, а отраженный свет падал на экран, расположенный наклонно над классной доской (рис. 1-79).

На борту ванны укрепляют вибратор, а на вибраторе — насадку с одним шариком, который должен касаться поверхности воды. Для ослабления отражения волн на пологие края ванны кладут полоски из какой-либо мягкой ткани и хорошо их смачивают.

Далее желательно на штативе с осветителем укрепить еще универсальный электродвигатель со стробоскопическим диском

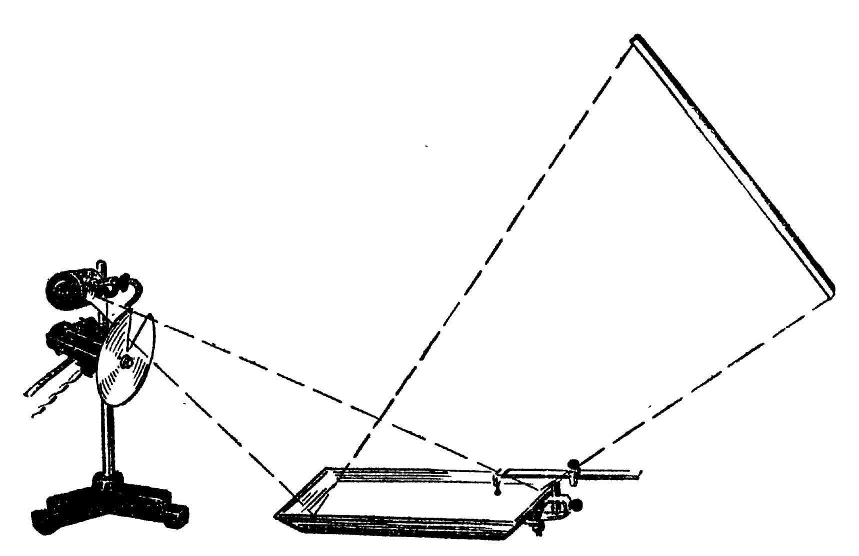


Рис. 1-79. Установка для демонстрации волн на поверхности воды в ванне с зеркальным дном.

так, чтобы диск пересекал пучок света, идущий от осветителя к ванне. Тогда, плавно регулируя число оборотов двигателя с помощью реостата или автотрансформатора, можно все явления, протекающие в ванне, показывать на экране в замедленном темпе, что значительно улучшает качество демонстраций.

Вначале показывают одиночные круговые волны. Для этого конец вибратора придерживают рукой и несколько раз быстро отрывают шарик от поверхности воды. На экране наблюдают ряд светлых и темных колец, расходящихся от места возбуждения.

Учащимся сообщают, что расходящиеся светлые и темные кольца представляют собой гребни и впадины волн; частицы воды, расположенные в различных точках одного и того же кольца, колеблются в одинаковых фазах и образуют фронт волны. Такие волны называют круговыми.

Затем демонстрируют непрерывный ряд круговых волн с помощью вибратора, возбуждая его периодически рукой (рис. 1-80, *а*).

Полезно показать, что наблюдаемые волны близки к поперечным. Для этого на поверхность воды бросают несколько мелких кусочков бумаги или спичек. Тени на экране от этих предметов остаются почти неподвижными: распространяющиеся волны не увлекают их за собой, а заставляют совершать, главным образом, вертикальные колебания.

Из наблюдений за распространением круговых волн (по неизменности формы фронта волны) можно сделать заключение

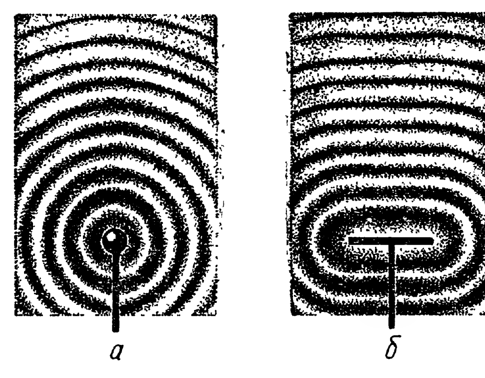


Рис. 1-80. Волны на поверхности воды: *а* — круговые, *б* — прямолинейные.

о том, что они распространяются по всем направлениям с одинаковой скоростью. Учитывая этот факт, легко показать далее связь между длиной волны, частотой и скоростью распространения колебаний. Для этого увеличивают частоту колебаний вибратора и наблюдают уменьшение длины волны.

Далее к вибратору вместо шарика приклепляют плоскую насадку и располагают ее параллельно поверхности воды. Возбуждают вибратор и наблюдают волны с прямолинейным фронтом (рис. 1-80, *б*) и, изменяя частоту колебаний вибратора, демонстрируют изменение длины волны.

Как было уже замечено выше, видимую скорость распространения волн можно изменять, если воспользоваться стробоскопической проекцией.

Изменяя постепенно скорость вращения электродвигателя со стробоскопическим диском, можно получить замедленное движение видимых на экране волн, остановить их и даже изменить направление движения на обратное, когда волны будут сбегаться к вибратору. Этого надо избегать, чтобы не отвлекать внимания учащихся от изучаемого явления.

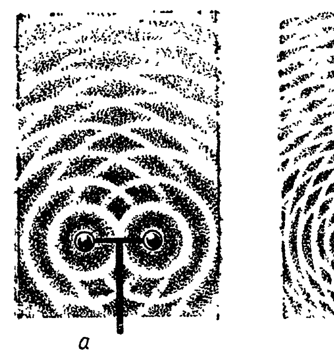
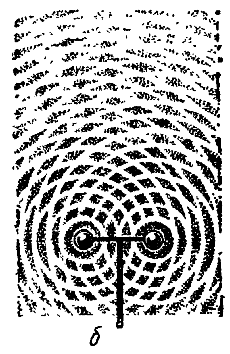
Вместо механического стробоскопа можно воспользоваться электронным.

ОПЫТ 33. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

Оборудование: 1) ванна для проецирования волн, 2) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 3) электродвигатель со стробоскопическим диском, 4) реостат сопротивлением 600 Ом или регулятор напряжения РНШ, 5) экран, 6) штатив универсальный, 7) кинофильм «Колебания и волны», ч. II, 9) кинопроектор.

Собирают установку с ванной для проецирования волн по рисунку 1-79. К вибратору прикрепляют насадку с двумя шариками так, чтобы при колебаниях они одновременно касались поверхности воды. Включают осветитель и один раз касаются шариками поверхности воды, создавая одиночные круговые волны. На экране наблюдают темные и светлые кольца, которые, разбегаясь от мест прикосновения шариков, встречаются и проходят дальше без всякого изменения формы. Опыт показывает, что волны от двух источников распространяются независимо друг от друга.

Возбуждают вибратор и получают непрерывный ряд круговых волн. Они, распространяясь, накладываются друг на друга на всей поверхности воды и образуют устойчивую картину интерференции, схематически изображенную на рисунке 1-81, *а*.

а *б*

Рис. 1-81. Интерференция волн на поверхности воды при различной частоте вибратора.

На экране хорошо заметен ряд направлений, по которым распространяются волны. Эти области разделяются светлыми «дорожками», где волнение воды значительно ослаблено.

Опираясь на знания, полученные учащимися при изучении механических колебаний (см. опыт 7), разъясняют причину наблюдаемого явления.

Любая из точек на поверхности воды одновременно участвует в двух колебаниях, вызванных каждой волной в отдельности. Амплитуда результирующего колебания такой точки зависит от величины амплитуд и фаз дошедших до нее волн. В тех точках, где волны сходятся в одинаковых фазах, происходит усиление и частицы воды колеблются с удвоенной амплитудой. В других же точках, где волны встречаются в противоположных фазах, колебания взаимно ослабляются и поверхность воды остается спокойной. На экране эти места имеют вид светлых «дорожек».

Так как расстояние до источников одной и той же точки постоянно и частота источников не меняется, то и разность фаз колебаний в этой точке остается неизменной. Поэтому раз установившийся эффект усиления или ослабления волн сохраняется с течением времени: на поверхности воды получается устойчивая интерференционная картина.

Если воспользоваться стробоскопической проекцией, то картину распространения волн можно сделать неподвижной. В этом случае легко показать, что максимумы интерференции получаются в тех местах, где разность хода волн равна нулю или целому числу длин волн (четному числу полуволн), а минимумы — в тех местах, где разность хода равна нечетному числу полуволн.

Разность хода легко определить подсчетом числа волн от каждого источника до выбранной точки.

Следует экспериментально подтвердить, что для возникновения устойчивой картины интерференции, наблюдаемой на экране, источники волн должны быть обязательно когерентными, т. е.

они должны иметь одинаковые фазы (или постоянную разность фаз), одинаковые частоты и колебаться в одной плоскости. С этой целью показывают следующий опыт.

Вместо вибраторов, закрепленных на одной колеблющейся пластинке, поверхность воды возбуждают двумя независимыми источниками — двумя изогнутыми проволочками, которые приводят в колебание от руки. Теперь на экране положение максимумов и минимумов все время меняется и устойчивой картины интерференции не получается.

Далее к вибратору снова прикрепляют насадку с двумя шариками и изменяют частоту колебаний. Оказывается, чем меньше длина волн, тем при прочих равных условиях максимумы располагаются ближе друг к другу (рис. 1-81, *б*). Делают вывод: по положению максимумов интерференции можно судить о длине волны.

Положение максимумов зависит также и от расстояния между источниками волн. Чтобы показать это, к вибратору прикрепляют другую насадку с двумя шариками, расположенными ближе друг к другу. В этом случае (при той же частоте вибратора) расстояние между максимумами увеличивается.

В заключение с целью повторения рекомендуется показать седьмой фрагмент «Интерференция волн» из учебного кинофильма «Колебания и волны» (ч. II), где в наглядной форме объясняется изучаемое явление.

ОПЫТ 34. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

Оборудование: 1) ванна для проецирования волн, 2) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 3) экран, 4) штатив универсальный.

Собирают установку с ванной для проецирования волн по рисунку 1-79. На дно ванны параллельно плоской насадке вибратора ставят в одну линию две плоские пластинки. Между ними оставляют щель шириной примерно 0,5 см. Включают осветитель и приводят в колебание вибратор.

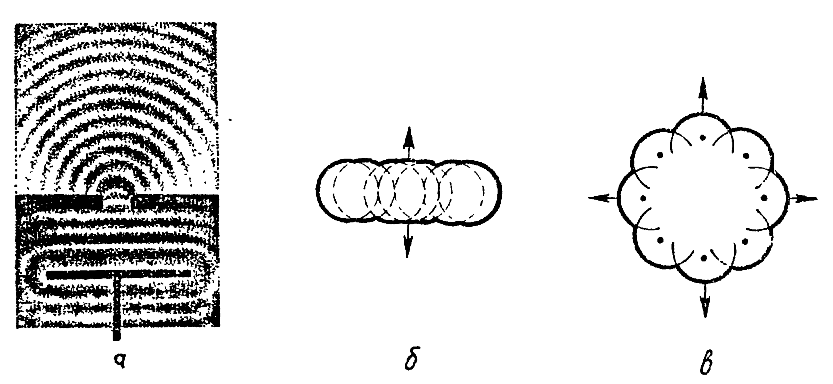


Рис. 1-82. Иллюстрации к принципу Гюйгенса.

На экране наблюдают, как прямолинейные волны, пройдя через отверстие, распространяются за преградой не только в прежнем направлении, но и во все стороны. Частицы воды, находящиеся в отверстии, как бы становятся новым центром колебания (рис. 1-82, *а*). Интенсивность круговых волн, распространяющихся за преградой, максимальна в направлении первоначального распространения волн и постепенно уменьшается с увеличением угла отклонения.

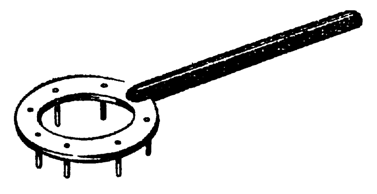


Рис. 1-83. Вибратор кольцевой.

Из этого опыта делают вывод: каждую точку среды, до которой дошел волновой фронт, можно рассматривать как новый источник колебаний, излучающий вторичную круговую волну (принцип Гюйгенса).

Чтобы показать, как ведут себя вторичные волны, к вибратору прикрепляют насадку с шестью шариками. Шарики погружают в воду и, когда вода в ванне успокоится, быстро поднимают вверх конец вибратора.

Опыт повторяют несколько раз и обращают внимание на то, как от каждого шарика на поверхности воды образуются круговые одиночные волны, которые можно рассматривать как вторичные. Они когерентны и, интерферируя, создают волну с прямолинейным фронтом. Только по краям фронт волны остается круговым (рис. 1-82, *б*).

Опыт полезно продолжить с самодельным вибратором в виде кольца диаметром 6—7 см, вырезанным из фанеры или плотного картона. В кольцо вбивают 8—10 небольших гвоздей, располагая их по окружности на одинаковых расстояниях (рис. 1-83).

Этот вибратор берут за ручку и всеми гвоздями одновременно касаются воды. При отрыве от поверхности воды острия гвоздей создают ряд круговых волн с огибающей в виде окружности (рис. 1-82, *в*).

ОПЫТ 35. ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Оборудование: 1) ванна для проецирования волн, 2) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 3) экран, 4) штатив универсальный, 5) шары различной массы с крючками — 2 шт., 6) шнур резиновый или трубка диаметром до 1 см и длиной 4—5 м.

Устанавливают ванну для проецирования волн и осветитель по рисунку 1-79. К вибратору прикрепляют плоскую насадку и регулируют ее положение так, чтобы при колебаниях она всеми точками одновременно касалась поверхности воды.

Опыт начинают с демонстрации отражения волн от плоского зеркала. Чтобы облегчить для учащихся наблюдение за рас-

пространением и отражением волн, вначале вибратор приводят в колебание рукой, создавая одиночные волны.

На экране наблюдают, как образовавшаяся волна доходит до плоской пластинки, поставленной на пути распространения волн, отражается от нее и изменяет свое направление. При этом фронт отраженной волны сохраняет свою форму.

Видимую скорость распространения волн можно уменьшить, если воспользоваться стробоскопом. Тогда можно наблюдать, как падающая волна касается прежде всего ближайшего конца пластинки. Точки фронта волны, которые пришли в соприкосновение с пластинкой, можно рассматривать на основании принципа Гюйгенса как новые центры колебаний, откуда распространяются элементарные круговые волны.

Части пластинки, расположенные дальше от вибратора, приходят в соприкосновение с волной позднее и потому позднее становятся центрами элементарных волн. Сложение всех элементарных волн дает прямолинейный фронт отраженной волны,

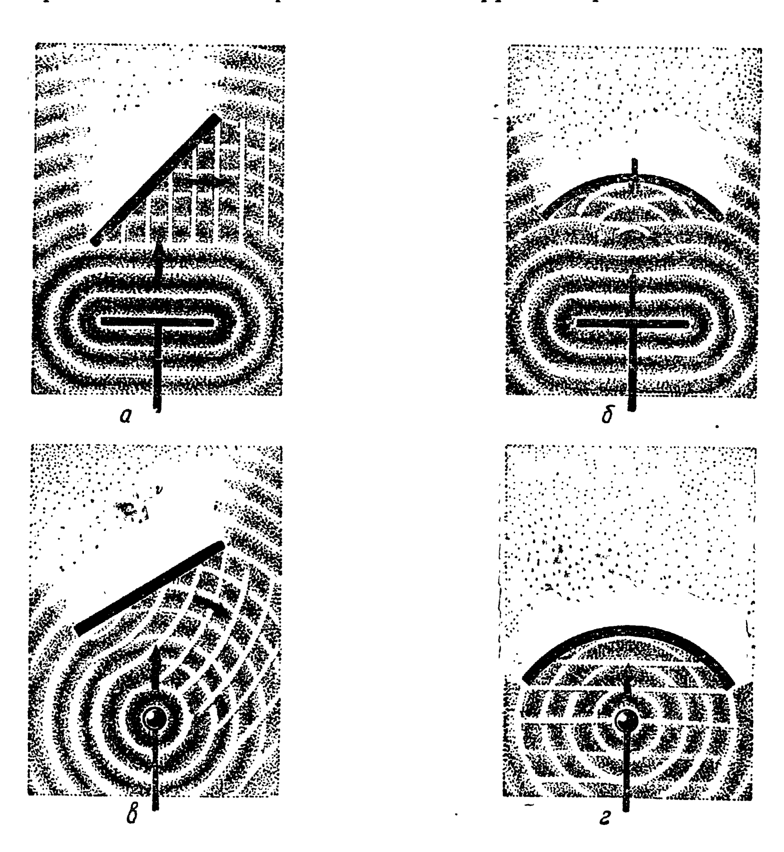


Рис. 1-84. Отражение волн от плоского и сферического зеркал.

который движется от пластинки в другом направлении. При четкой проекции можно наблюдать углы падения и отражения и отметить равенство этих углов.

Затем пользуются вибратором и наблюдают непрерывный процесс распространения и отражения волн (рис. 1-84, *а*). Обращают внимание на изменение направления отраженных волн и на их ослабление по сравнению с падающими, вследствие поглощения части энергии телом, от поверхности которого происходит отражение.

Можно заметить также сетку стоячих волн, которая образуется перед пластинкой в результате интерференции падающих и отраженных волн.

После этого в ванну помещают вогнутое зеркало на расстоянии примерно 15—20 см от вибратора и снова повторяют опыт. В этом случае на экране отчетливо видно, как волны, отразившись от зеркала, собираются в одну точку — главный фокус, а затем опять расходятся (рис. 1-84, *б*). При этом фронт отраженных волн принимает форму концентрических дуг.

Это явление объясняется тем, что теперь волны сначала достигают краев пластинки. Поэтому элементарные волны здесь образуются раньше, чем в середине пластинки. Наложение этих волн и дает систему отраженных волн с круговым фронтом.

Далее к вибратору прикрепляют насадку с одним шариком и показывают отражение от плоского зеркала круговых волн. Они имеют форму концентрических дуг, разбегающихся как бы из центра, лежащего позади пластинки (рис. 1-84, *в*).

При отражении круговых волн от вогнутого зеркала отраженные волны сбегаются в одну точку — фокус зеркала, при этом фронт волны может принимать различную форму. Например, если шарик вибратора поместить в главном фокусе зеркала (6—7 см от зеркала), то отраженные волны имеют прямолинейный фронт (рис. 1-84, *г*).

В этих опытах видимую скорость распространения волн можно также уменьшить, если воспользоваться стробоскопической проекцией.

Далее следует разобрать два случая отражения: 1) от более плотной среды с потерей полуволны и 2) от менее плотной среды без потери полуволны. Оба случая демонстрируют на резиновом шнуре или трубке.

Для наблюдения отражения волн от более плотной среды резиновую трубку прикрепляют одним концом к крюку, ввернутому в стену.

Трубку слегка натягивают поперек класса и ударом руки или линейки возбуждают одиночную волну. При этом наблюдают сравнительно медленное распространение волны вдоль трубки вперед впадиной и ее возвращение обратно вперед гребнем (отражение с потерей полуволны), как это показано на рисунке 1-85.

Чтобы полнее выяснить механизм рассматриваемого отражения, показывают опыт с двумя маятниками, имеющими одинаковую длину, но разные массы (рис. 1-86). Маятник с малой массой моделирует одну из крайних частиц резиновой трубки, а маятник с большой массой — соседнюю частицу среды, отражающей вóлны.

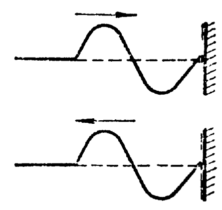


Рис. 1-85. Отражение волн с потерей полуволны.

Отклоняют малый маятник на некоторый угол и отпускают. Он начинает колебание, но, ударившись о большой, отскакивает от него, не закончив второй половины своего колебания. Иначе говоря, движение малого маятника изменяется так, что после первой четверти периода его колебания наступает сразу же четвертая четверть; вторая и третья четверти периода выпадают. Большой маятник при этом остается на месте.

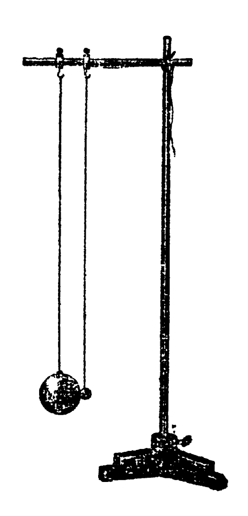


Рис. 1-86. Маятники разной массы.

Опыт повторяют несколько раз и сообщают, что примерно то же самое происходит и в случае отражения волны, бегущей по резиновой трубке от крюка стены. Таким образом, при отражении волны от более плотной среды на границе раздела сред фаза колебания меняется на 180°, что и приводит к потере полуволны.

Для наблюдения отражения волн от менее плотной среды между резиновой трубкой и крюком стены привязывают кусок веревки длиной 20—30 см.

Ударом руки или линейки снова возбуждают в трубке волну. Теперь отраженная волна возвращается вперед впадиной, т. е. отражение происходит без потери полуволны (рис. 1-87).

Для уяснения механизма этого отражения снова возвращаются к опыту с маятниками. Теперь отклоняют большой маятник в сторону и отпускают. При этом малый маятник, получив толчок, отскакивает от большого, так как он не в состоянии изменить фазу колебаний последнего. Большой же маятник продолжает движение в прежнем направлении и проходит последовательно все фазы колебания.

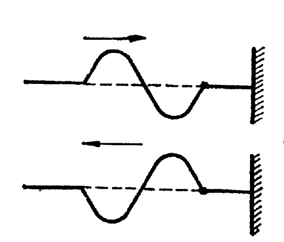


Рис. 1-87. Отражение волн без потери полуволны.

Нечто подобное происходит и в случае отражения волн от менее плотной среды.

ОПЫТ 36. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Оборудование: 1) машина волновая, 2) электродвигатель с эксцентриком и поводком, 3) шнур резиновый или трубка диаметром до 1 см и длиной 4—5 м, 4) линейка стальная длиной 80—100 см, 5) аппарат проекционный, 6) экран, 7) кювета разборная на стержне, 8) кинофильм «Колебания и волны», ч. II, 9) кинопроектор.

Стоячие волны легко получить, используя отражение волн на резиновом шнуре. Шнур берут за непривязанный конец, слегка натягивают поперек класса и приводят в колебание в вертикальной плоскости [1]. Частоту колебаний и натяжение шнура подбирают практически так, чтобы сначала на шнуре образовалась одна стоячая волна, затем две и, наконец, три (рис. 1-88). Большее число стоячих волн получить вручную трудно, но в этом нет необходимости.

Учащимся разъясняют, что вдоль шнура распространяются в противоположных направлениях две волны — прямая и отраженная. Эти волны когерентны; они интерферируют друг с другом и дают наблюдаемую картину стоячих волн.

Те точки шнура, в которых волны встречаются в одинаковых фазах, колеблются с наибольшей амплитудой (пучности); те же точки, в которых волны встречаются в противоположных фазах, остаются в покое (узлы). Расстояние между двумя соседними узлами или пучностями называют длиной стоячей волны. Как показывает опыт, длина стоячей волны в два раза короче бегущей.

Отмечают, что в пучностях стоячей волны сосредоточивается главным образом кинетическая энергия, а в узлах — потенциальная. Когда частицы шнура проходят положение равновесия, кинетическая энергия достигает максимума, а потенциальная энергия становится минимальной. Через четверть периода кинетическая энергия убывает до нуля, а потенциальная становится максимальной, так как в этот момент в областях около узлов растяжение шнура становится наибольшим.

Таким образом, в стоячей волне происходит непрерывное превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно. При этом энергия не перемещается в пространстве, остается на месте. Отсюда и происходит название «стоячая волна».

Механизм образования стоячих волн можно повторить, если воспользоваться учебным кинофильмом «Колебания и волны» и показать из него восьмой фрагмент «Стоячие волны».

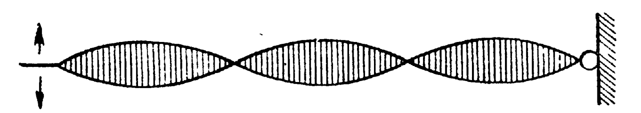


Рис. 1-88. Стоячие волны на резиновом шнуре.

[1] Шнур можно подвесить и в вертикальном положении.

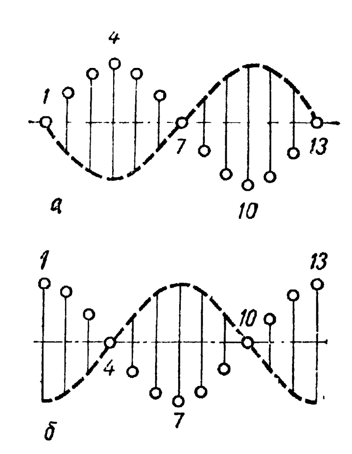


Рис. 1-89. Модель стоячих волн на волновой машине.

Характер движения частиц в стоячей волне уточняют с помощью волновой машины, которую предварительно приводят в такое положение, как и для демонстрации распространения поперечных волн (см. рис. 1-75). Но рукоятку диска не вращают, а сообщают ей колебательное движение в какой-либо плоскости, перпендикулярной к плоскости щитка. Во всех случаях на машине получаются две стоячие волны, узлы и пучности которых распределяются в зависимости от направления колебаний рукоятки.

Если рукоятке сообщать колебания в горизонтальной плоскости, то шарики *1*, *7* и *13* остаются неподвижными (узлы), а шарики *4* и *10* колеблются с наибольшей амплитудой (рис. 1-89, *а*). При колебаниях рукоятки в вертикальной плоскости остаются неподвижными шарики *4*, *10* (узлы), а шарики *1*, *7* и *13* колеблются с наибольшей амплитудой, т. е. пучности получаются на концах и в середине (рис. 1-89, *б*).

Полезно также обратить внимание на различие между стоячей и бегущей волнами. Учащиеся уже знают, что в бегущих волнах частицы среды колеблются с одинаковой амплитудой (если не учитывать затухания), но фазы их различны. В стоячей волне, наоборот, все частицы между двумя соседними узлами колеблются в одинаковой фазе, но амплитуды их различны. При переходе через узел фаза колебания частиц изменяется скачком на противоположную. Это легко наблюдать на волновой машине.

Для получения стоячих продольных волн машину приводят в положение, при котором на ней демонстрируют распространение продольных волн (см. рис. 1-77). Ручку зажима не вращают, а двигают прямолинейно по диаметру окружности, на которой размещены отверстия для нитей.

Расположение узлов и пучностей и в этом случае будет зависеть от направления движения рукоятки. Если зажим двигать в горизонтальном направлении, то шарики *1*, *7* и *13* будут стоять на месте (узлы), а шарики *4* и *10* — колебаться с наибольшей амплитудой (пучности), т. е. на машине опять укладываются две стоячие волны.

При движении зажима вдоль вертикали шарики *4* и *10* остаются неподвижными (узлы), а шарики *1*, *7* и *13* колеблются с наибольшей амплитудой (пучности).

Фазы колебания всех шариков между двумя соседними узлами остаются одинаковыми, а при переходе через узел изменяются на 180°.

Таким образом, характер движения частиц в стоячей волне такой же, как и при упругих колебаниях тела, например спиральной пружины с грузом или стальной пластинки. На рисунке 1-90 показаны виды стоячих поперечных волн, которые можно без затруднений получить на упругой пластинке при колебаниях ее вручную.

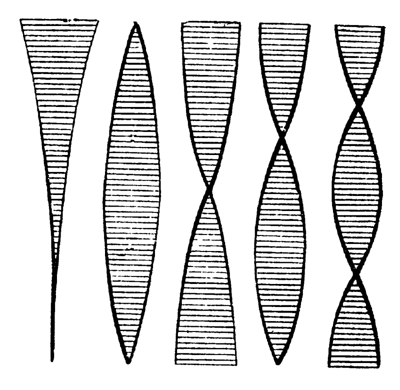


Рис. 1-90. Стоячие волны на стальной линейке.

Некоторые закономерности можно также демонстрировать, возбуждая стоячие волны на резиновом шнуре. Для этого берут электродвигатель, укрепляют его в треноге универсального штатива привернутой к столу струбцинкой. На выступающий конец вала электродвигателя надевают диск с эксцентриком и закрепляют его стопорным винтом.

На ролик эксцентрика надевают металлический поводок (он входит в комплект электродвигателя), а к поводку прикрепляют шнур. Свободный конец шнура берут в руку и располагают его горизонтально вдоль демонстрационного стола. Пускают электродвигатель и, слегка натягивая шнур, добиваются четких и устойчивых стоячих волн.

Для демонстрации зависимости длины волны от частоты колебаний увеличивают или уменьшают число оборотов электродвигателя. При этом число стоячих волн, укладывающихся на шнуре, изменяется.

При увеличении силы натяжения шнура число стоячих волн уменьшается, а длина их увеличивается. Это объясняется тем, что скорость распространения волн в шнуре возрастает с увеличением его натяжения.

Постепенно увеличивая длину колеблющейся части шнура на величину одной, двух, трех и т. д. длин волн, показывают зависимость числа волн от длины шнура. Если длину шнура изменять произвольно, то при прочих равных условиях стоячие волны или не возникают, или будут неустойчивыми.

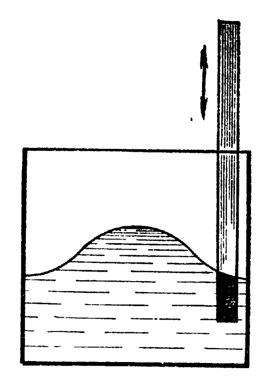


Рис. 1-91. Стоячие волны на поверхности воды.

В заключение показывают стоячие волны на воде. Их можно демонстрировать в обычной прозрачной кювете с плоскопараллельными стенками. Для этого кювета с водой проецируется на экран с помощью про-

екционного аппарата. Волны возбуждают концом карандаша, который приводят в вертикальные колебания рукой около края кюветы (рис. 1-91).

ОПЫТ 37. ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН

Оборудование: 1) ванна для проецирования волн, 2) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 3) экран, 4) штатив универсальный.

Преломление волн лучше всего демонстрировать на волнах, образующихся на поверхности воды. Скорость их распространения зависит от глубины слоя воды, налитой в ванну для проецирования. Это обстоятельство и дает возможность показать явление преломления.

Для демонстрации опыта собирают установку с ванной для проецирования по рисунку 1-79. На дно ванны кладут стеклянную пластинку в виде прямоугольной призмы. С обеих сторон призмы ставят плоские вертикальные экраны, обернутые тканью для уменьшения отражения волн. В ванну наливают столько

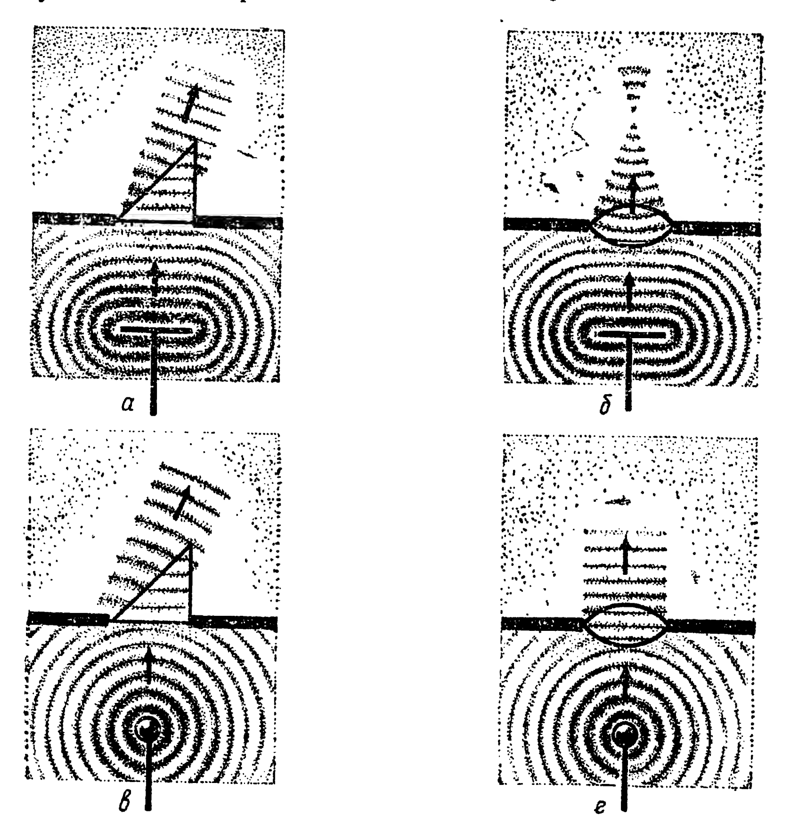


Рис. 1-92. Преломление волн при прохождении над призмой и над линзой.

воды, чтобы она покрывала призму слоем 2—3 мм. К вибратору прикрепляют плоскую насадку и сообщают ему колебательное движение.

На экране наблюдают уменьшение длины волн над призмой и изменение их направления после прохождения через призму (рис. 1-92, *а*). Это объясняют тем, что в более мелких местах (над призмой) волны испытывают большее сопротивление и распространяются с меньшей скоростью, чем в других глубоких местах.

Затем на место призмы кладут стеклянную пластинку в форме линзы. Возбуждают вибратор и получают на экране картину, показанную на рисунке 1-92, *б*. Волны, пройдя над линзой, собираются в одной точке (фокусе), а затем расходятся, имея круговой фронт.

Наблюдаемое явление объясняется тем, что волны, проходящие над серединой линзы, дольше движутся с малой скоростью, чем над краями линзы. В результате этого происходит искривление фронта.

Опыт можно демонстрировать также и с круговыми волнами. При этом на экране будут наблюдаться картины, схематически изображенные на рисунках 1-92, *в* и *г*.

Для успеха описанного опыта необходимо тщательно подобрать глубину слоя воды над пластинкой, частоту и амплитуду колебаний вибратора, а также положение осветителя. Кроме того, применение стробоскопической проекции увеличивает выразительность опыта.

ОПЫТ 38. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

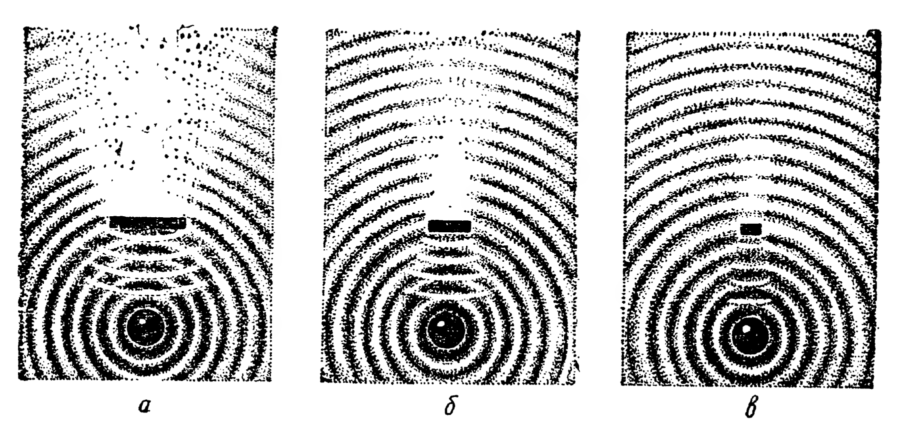
Оборудование: то же, что и в предыдущем опыте.

Собирают установку с ванной для проецирования волн по рисунку 1-79. На вибратор надевают насадку с одним шариком, а на дно ванны на расстоянии 15—20 см от вибратора ставят тело прямоугольной формы, размеры которого в несколько раз больше длины волны.

Включают осветитель для теневого проецирования и приводят в колебание вибратор. На экране наблюдают распространение волн и «тень», образующуюся позади препятствия. Вдоль границ «тени» замечают небольшую зыбь, указывающую, что волны слегка огибают края препятствия (рис. 1-93, *а*).

Затем на дно ванны ставят тело, размеры которого в два-три раза больше длины волны. Теперь волны еще больше заходят в область геометрической тени, и ее контуры становятся размытыми (рис. 1-93, *б*).

Наконец, заменяют тело таким, размеры которого примерно одинаковы с длиной волны. Замечают, что в данном случае образование тени практически уже не происходит: волны огибают препятствие и позади него распространяются так, как если бы препятствия не было (рис. 1-93, *в*).



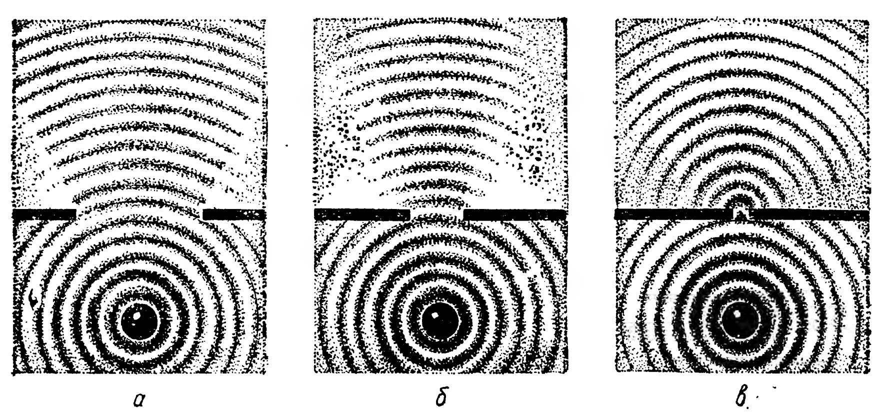
а б в

Рис. 1-93. Дифракция волн на препятствиях разных размеров.

Таким образом, при приближении размеров препятствия к размерам длины волны наблюдается нарушение прямолинейности распространения волн, т. е. явление дифракции волн.

Желательно подчеркнуть, что дифракция получается и с первым телом, только наблюдать ее в этом случае трудно: она образуется далеко от тела, а интенсивность волн на больших расстояниях мала.

В этих опытах можно заметить также слабые отраженные круговые волны. Их можно обнаружить и в том случае, если размеры препятствия во много раз меньше длины волны, например от проволоки, поставленной в воду вертикально. Образование таких волн представляет собой особый случай дифракции, называемый рассеиванием волн. Благодаря такому рассеиванию можно обнаружить мелкие предметы, поставленные на пути распространения волн.



а б в

Рис. 1-94. Дифракция волн на щели различной ширины.

Далее следует показать прохождение волн через щель различной ширины. Для этого на дно ванны ставят плоские экраны так, чтобы между их концами образовалась щель. Когда ширина щели велика по сравнению с длиной падающей волны, явление дифракции выражено слабо (рис. 1-94, *а*). По мере сужения щели все больше наблюдается загибание волн за края экранов (рис. 1-94, *б*). И когда ширина щели становится сравнимой с длиной волны, позади экранов получаются полукольцевые волны, расходящиеся во все стороны из щели, как из центра (рис. 1-94, *в*).

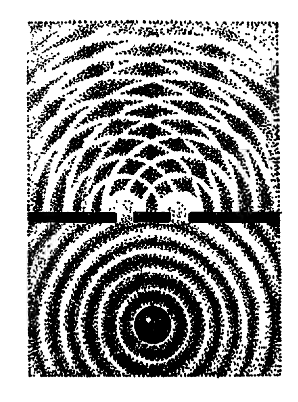


Рис. 1-95. Дифракция волн на двух щелях.

Полезно показать также дифракцию на двух щелях. Для этого плоские пластинки перевертывают вырезами вниз, а концы их соединяют вплотную друг к другу. Позади пластинок наблюдают одновременно два явления — дифракцию и интерференцию волн (рис. 1-95).

В заключение показывают распространение круговых и прямолинейных волн на свободной поверхности воды. При этом обращают внимание учащихся на то, что в круговой волне энергия от вибратора распространяется по всем направлениям; в волне же с прямолинейным фронтом энергия переносится направленно (см. рис. 1-80).

ОПЫТ 39. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) громкоговоритель электродинамический, 3) телефон электромагнитный, 4) микрофон электродинамический, 5) усилитель низкой частоты, 6) камертон на резонаторном ящике, 7) колокол стеклянный от воздушного насоса, 8) струна, натянутая на металлическом стержне, 9) сирена дисковая или зубчатая, 10) машина центробежная червячная, 11) молоточек резиновый для возбуждения камертонов, 12) провода соединительные с наконечниками, 13) кинофильм «Звук», 14) кинопроектор.

Цель данного опыта — кратко ознакомить учащихся с различными источниками и приемниками звука, которые будут применяться в дальнейших опытах по акустике, сравнить их между собой и показать классификацию.

Вначале рассматривают *источники, в которых звук возникает в результате свободных колебаний*. Учащимся известно, что такие колебания появляются в результате некоторого начального толчка, а частота колебаний определяется свойствами самой колебательной системы.

С этой целью демонстрируют звучание камертона. Его берут в руку за ножку и возбуждают ударом резинового молоточ-

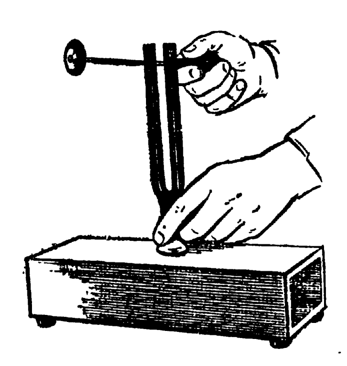


Рис. 1-96. Возбуждение камертона резиновым молоточком.

ка. Камертон издает чистый, но негромкий звук. Последнее объясняют тем, что звуковые волны, возникающие от ветвей камертона, интерферируют между собой и в значительной степени гасят друг друга. Это заставляет на практике соединять камертон с каким-либо другим хорошим источником излучений, который под действием камертона совершает вынужденные колебания, и, кроме того, использовать явление резонанса.

Показать это можно следующим образом. Звучащий камертон сначала держат в руке, затем ставят ножкой на крышку стола и, наконец, помещают на резонаторный ящик. Учащиеся совершенно отчетливо замечают разницу в громкости звучания во всех трех случаях. Повертывая камертон резонаторным ящиком от учащихся, а затем к ним, показывают, что ящик, кроме того, действует подобно рупору, направляя звуковые волны в одну сторону.

При ударе молоточком камертон необходимо слегка приподнимать над столом, удерживая его за гнездо, в которое он вставлен в ящик (рис. 1-96). Если камертон при ударе не приподнимать, а, наоборот, прижимать к столу, то можно испортить крышку ящика или выбить из нее гнездо для камертона.

Затем демонстрируют звучание стеклянного колокола от воздушного насоса. Его приподнимают за головку левой рукой, а правой ударяют по краю резиновым молоточком. Благодаря большой поверхности колокол издает довольно громкий звук.

Далее демонстрируют звучание струны от гитары или мандолины. Ее натягивают между двумя зажимами на длинном металлическом стержне от универсального штатива (рис. 1-97).

Возбуждают струну рывками, держа стержень в руке. Оказывается, струна как излучатель звука еще хуже, чем камертон. Однако громкость резко возрастает, если стержень положить на стол. Увеличение громкости объясняют тем, что теперь вместе со струной колеблется и крышка стола. Аналогично действует дека различных музыкальных инструментов.

Указанные источники обладают сравнительно малым затуханием, и создаваемые ими звуки имеют периодический характер. Такие звуки называют музыкальными тонами.

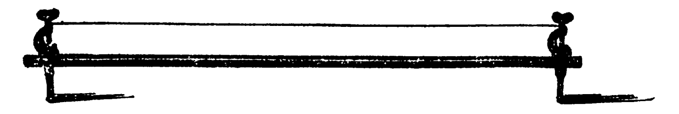


Рис. 1-97. Струна на стержне штатива.

Однако если скорость затухания источника велика, то звуки почти теряют свою музыкальность и приобретают характер удара или щелчка. Такие быстро затухающие колебания демонстрируют на звуках, возникающих, например, при ударе двух деревянных дощечек.

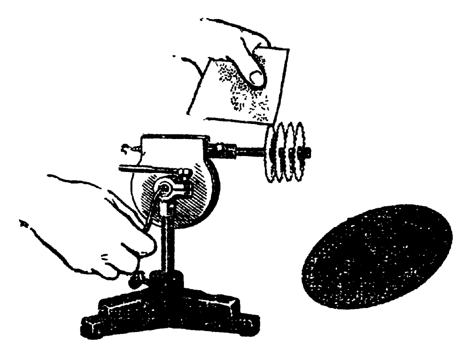


Рис. 1-98. Демонстрация зубчатой и дисковой сирен.

Напоминают учащимся *источники, в которых звук возбуждается в результате возникновения автоколебаний.*

Из музыкальных инструментов возбуждение автоколебаний имеет место, например, в смычковых и духовых инструментах, а также в голосовом аппарате человека.

Наконец, демонстрируют *источники, в которых звук создается в результате вынужденных колебаний.*

Показывают известные опыты с сиренами, которые приводят в равномерное вращение с помощью центробежной машины (рис. 1-98). Отмечают, что в этом случае звук возникает от частых ударов зубцов по краю упругой картонки (сирена зубчатая) или отверстий (сирена дисковая). Картонка при этом совершает лишь вынужденные колебания. Частота этих колебаний определяется числом зубьев или отверстий сирены и скоростью ее вращения.

Затем демонстрируют наиболее распространенные в настоящее время электроакустические излучатели — динамический громкоговоритель (динамик) и электромагнитный телефон. Указанные излучатели подключают поочередно к звуковому генератору и заставляют звучать на различных частотах при различной громкости (рис. 1-99). Обращают внимание учащихся, что диффузор громкоговорителя и мембрана телефона лишь воспроизводят (более или менее точно) колебания, к которым их вынуждает переменный электрический ток звуковой частоты.

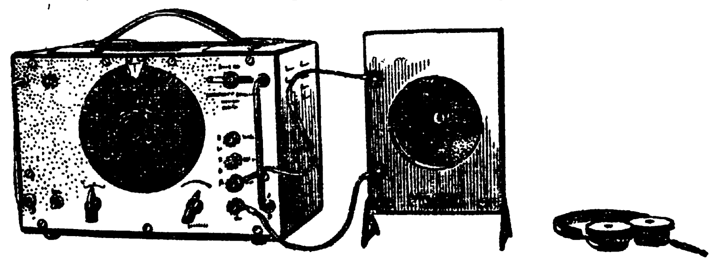


Рис. 1-99. Возбуждение динамика или телефона звуковым генератором.

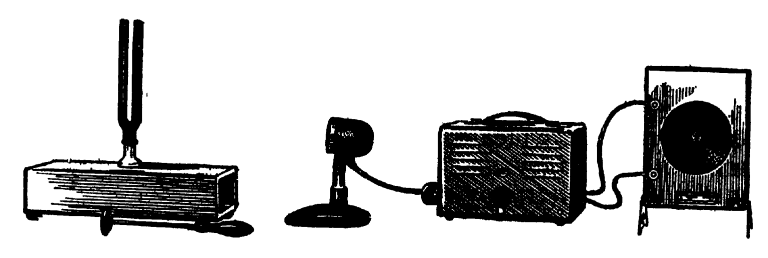


Рис. 1-100. Установка для демонстрации действия микрофона.

Из *приемников звука* демонстрируют современный *динамический микрофон*. Его включают на вход усилителя низкой частоты и располагают подальше от громкоговорителя, чтобы исключить возникновение акустической связи (рис. 1-100). К микрофону подносят какой-нибудь источник звука, например звучащий камертон на резонаторном ящике. Учащиеся слышат громкий звук того же тона.

Показывают, что приемниками звука может быть также динамический громкоговоритель или телефон (явление обратимости). Их подключают к усилителю низкой частоты с помощью экранированных проводов.

Для закрепления материала учащимся демонстрируют первый фрагмент «Звуковые колебания» из учебного кинофильма «Звук»[1]. В этом фрагменте рассматривается природа звуковых колебаний, звучат музыкальные инструменты — арфа, скрипка, фагот, барабан и др.

ОПЫТ 40. ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕ ЗВУКА

Оборудование: 1) осциллограф электронный ОЭШ, 2) микрофон электродинамический, 3) генератор звуковой школьный, 4) громкоговоритель электродинамический, 5) камертон на резонаторном ящике, 6) камертон с пером, 7) стержень из полосовой стали с резонатором, 8) аппарат проекционный с приспособлением для горизонтальной проекции, 9) молоточек резиновый для возбуждения камертонов, 10) пластинка стеклянная закопченная, 11) провода соединительные с наконечниками.

Самый простой способ записи колебаний камертона — запись на закопченной стеклянной пластинке. На верхнюю, горизонтально расположенную, конденсорную линзу проекционного аппарата помещают предварительно закопченную с одной стороны стеклянную пластинку (рис. 1-101). В слое копоти делают небольшую царапину и, перемещая объектив, получают на экране ее резкое изображение.

Затем возбуждают камертон низкого тона ($\nu=64$ Гц) с металлическим острием и быстро проводят им по закопченному

---

[1] Звук. Московская студия научно-популярных фильмов, 1968, 1 ч. Продолжительность демонстрации — 9 мин.

стеклу. На черном фоне экрана учащиеся наблюдают образование светлой синусоиды. Для получения графика колебаний любого источника звука удобно воспользоваться электронным осциллографом. В этом случае собирают установку по рисунку 1-102. На вход вертикального усилителя осциллографа включают электродинамический микрофон. Переключатель аттенюатора ставят в положение до 5 В, а переключатель диапазона развертки — в положение 30.

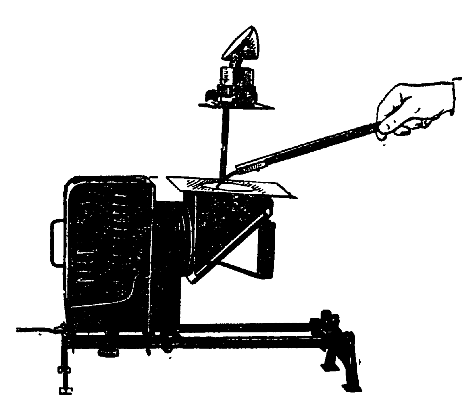


Рис. 1-101. Демонстрация записи колебаний камертона.

Перед микрофоном устанавливают звучащий камертон на резонаторном ящике и, пользуясь регулятором плавного изменения частоты горизонтальной развертки, получают на экране устойчивое изображение нескольких синусоид. Регулятором усиления по вертикали подбирают подходящую величину амплитуды.

Свободные колебания камертона и резонирующего столба воздуха в ящике через некоторое время затухают вследствие потери энергии на трение и излучение звука. Тогда камертон возбуждают снова ударом резинового молоточка и продолжают наблюдение.

Затем к микрофону подносят поочередно на некоторое время возбужденную струну, громкоговоритель (динамик), питаемый от звукового генератора. Для каждого источника получают устойчивую осциллограмму. Чтобы не затягивать опыта, источники предварительно настраивают на одинаковую высоту тона.

Наблюдая осциллограммы, учащиеся убеждаются, что каждый источник звука имеет свой график колебания. У камертона

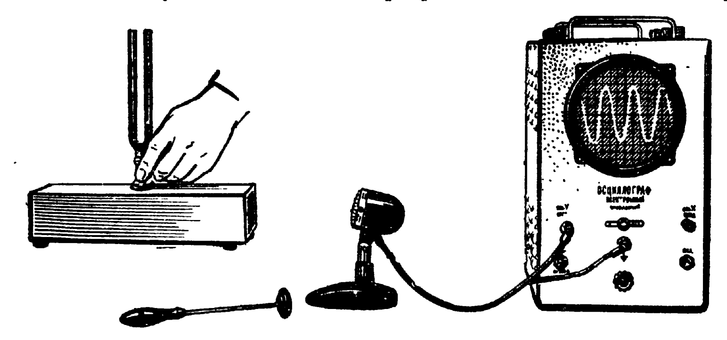


Рис. 1-102. Получение осциллограммы колебаний камертона.

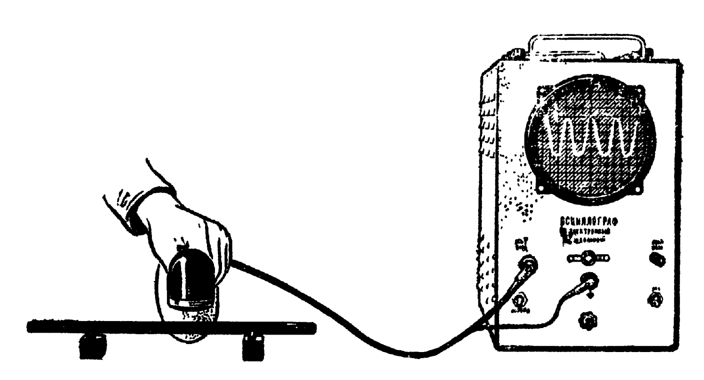


Рис. 1-103. Обнаружение узлов и пучностей у звучащего стержня.

и громкоговорителя, совершающего вынужденные колебания, графики имеют вид синусоиды; следовательно, указанные источники колеблются гармонически [1]. Свободные колебания струны имеют сложный, негармонический характер.

В качестве другого примера сложных колебаний показывают осциллограммы отдельных гласных и шипящих звуков, а также шума.

Периодические и близкие к периодическим звуки называют музыкальными тонами. Звуки, излучаемые камертоном и громкоговорителем, питаемым от звукового генератора, дают представление о чистом музыкальном тоне.

Далее перед микрофоном стучат деревянными дощечками и наблюдают осциллограммы быстро затухающих колебаний. Ухо воспринимает эти звуки как удары, почти лишенные тональности. Опираясь на проделанные опыты, делят звуки на три группы: музыкальные, или тоны, удары и шумы.

Если в кабинете есть стержень из полосовой стали, настроенный на тон «ля» (440 Гц), то можно провести исследование колебаний звучащего тела. Стержень укладывают на деревянные подставки с резиновыми амортизаторами, как показано на рисунке 1-103, при этом резиновые амортизаторы помещают под метками, нанесенными на стержне.

Резким ударом резинового молоточка возбуждают стержень и дают возможность учащимся послушать издаваемый им звук. Затем к середине стержня сверху подносят микрофон, соединенный с осциллографом, и получают устойчивую осциллограмму колебаний стержня. Вновь возбуждают поперечные колебания в стержне и медленно передвигают вдоль него микрофон на высоте 2—3 см. При этом замечают непрерывное изменение амплитуды колебаний на экране осциллографа. Когда микрофон ока-

[1] Неизбежное отклонение от периодичности у камертона, обусловленное его затуханием, невелико, и его можно не учитывать.

зывается на краях и в середине стержня, амплитуда колебаний достигает наибольшего значения (пучности!), а над резиновыми амортизаторами она равна нулю (узлы!). Опыт показывает, что в возбужденном стержне образуются стоячие волны.

Точно таким же способом обнаруживают узлы и пучности стоячих волн у звучащего камертона. Камертон для этого опыта берут без резонаторного ящика.

ОПЫТ 41. ЗВУКОПРОВОДНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СРЕД

Оборудование: 1) насос вакуумный Комовского с резиновым шлангом, 2) тарелка вакуумная, 3) колокол стеклянный, 4) звонок электрический демонстрационный, 5) камертон на резонаторном ящике (259 или 440 Гц), 6) набор различных стержней (железный, деревянный, резиновый) длиной 15—20 см и диаметром 1—2 см, 7) стакан высокий ВН-500 с водой, 8) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 9) молоточек резиновый для возбуждения камертонов, 10) провода соединительные с наконечниками, 11) кусок микропористой резины.

В начале показывают хорошо известный опыт с электрическим звонком, помещенным под колокол воздушного насоса (рис. 1-104).

При откачивании воздуха из колокола звук постепенно слабеет и наконец становится очень тихим. Если снова впустить воздух, то громкость звука восстанавливается. Опыт раскрывает роль среды в передаче звука: если между источником и приемником звука удалить среду, то звук не сможет распространяться.

Для увеличения выразительности этого опыта звонок под колоколом ставят на подставку из микропористой резины.

Затем демонстрируют различную звукопроводность твердых и жидких тел.

На крышку резонаторного ящика ставят деревянный стержень, а к верхнему концу его прижимают возбужденный камертон (рис. 1-105). Звучание камертона резко усиливается.

Опыт повторяют с другими телами: железным стержнем и микропористой резиной. В первом случае из резонаторного ящика слышен громкий звук, во втором — звука почти не слышно. Делают вывод: звукопроводность твердых тел различна; мягкие и пористые тела — плохие проводники звука.

Для демонстрации звукопроводности воды ее наливают в высокий стакан, который также ставят на крышку резонаторного ящика. На ножку камертона надевают предварительно корковую или деревянную пробку, диаметр которой на 1—2 см меньше диаметра сосуда. Затем возбуждают ка-

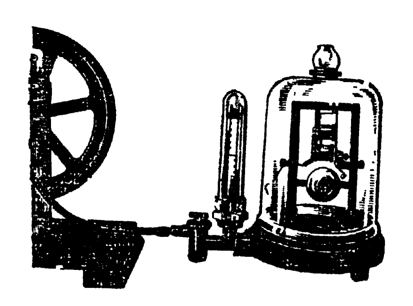


Рис 1-104. Электрический звонок под колоколом воздушного насоса.

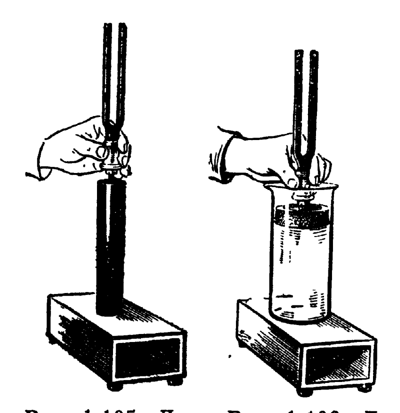


Рис. 1-105. Демонстрация звукопроводности твердого тела.

Рис. 1-106. Демонстрация звукопроводности жидкости.

мертон и опускают ножку в воду на глубину 1—2 см (рис. 1-106). Громкость звука заметно усиливается, что доказывает хорошую звукопроводность воды и сосуда.

В этих опытах можно достичь большего эффекта, если воспользоваться электроакустической аппаратурой. В таком случае собирают установку по рисунку 1-107. На вход усилителя низкой частоты с помощью экранированных проводов включают электромагнитный телефон со снятой крышкой, а на вход усилителя — громкоговоритель. Исследуемые стержни ставят поочередно на открытую мембрану и также прикасаются к ним сверху ножкой возбужденного камертона.

Сечение испытуемых стержней должно быть немного меньше площади мембраны, а их длина — 15—20 см для того, чтобы устранить непосредственную связь через воздух между источником и приемником звука. Стержни следует поддерживать рукой и лишь слегка прижимать к мембране, иначе ее колебания погасятся. Телефон, выполняющий роль микрофона, надо располагать подальше от громкоговорителя, чтобы избежать акустической связи.

ОПЫТ 42. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) осциллограф электронный ОЭШ, 3) усилитель низкой частоты, 4) микрофон и громкоговоритель электродинамические, 5) метр демонстрационный, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) кинофильм «Звук», 8) кинопроектор,

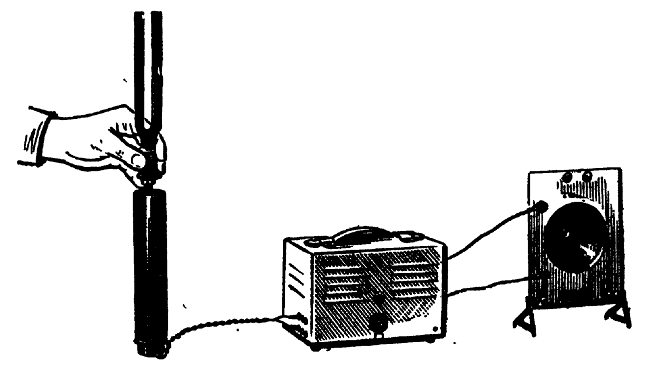


Рис. 1-107. Демонстрация звукопроводности твердого тела с применением электроакустических приборов.

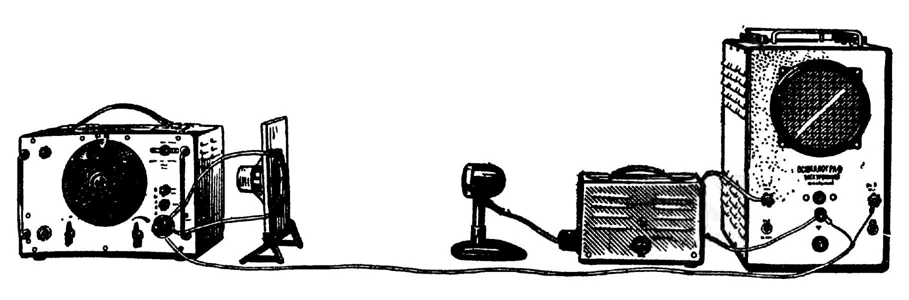


Рис. 1-108. Установка для измерения скорости звука в воздухе.

Собирают установку по рисунку 1-108. К звуковому генератору подключают громкоговоритель и возбуждают его на частоте примерно 1000 Гц. Напряжение со звукового генератора подают также на вход горизонтального усилителя осциллографа, причем собственный генератор развертки осциллографа выключается. На экране получают светлую горизонтальную полоску. С помощью ручки горизонтального усилителя длину светлой полоски увеличивают приблизительно до половины диаметра экрана.

На расстоянии 1—1,5 м от звучащего громкоговорителя располагают микрофон, соединенный с усилителем низкой частоты. Выход усилителя соединяют с входом вертикального усилителя осциллографа.

При одновременном воздействии двух взаимно перпендикулярных синусоидальных напряжений одного и того же периода (от микрофона и генератора) электронный луч выписывает на экране осциллографа одну из фигур Лиссажу. В зависимости от того, какова разность фаз между слагаемыми колебаниями, фигура может иметь вид прямой линии, эллипса или окружности (рис. 1-109). Если амплитуды колебаний электронного луча по вертикали и горизонтали неодинаковы, то эллипсы становятся более сплющенными, окружность превращается в эллипс, а наклон прямых к осям изменяется. Для устранения искажения фигур пользуются ручками усилителей осциллографа.

После этого микрофон медленно приближают к громкоговорителю и наблюдают видоизменения фигур Лиссажу. Когда фигура превратится в прямую линию, наклоненную к горизонтали под углом 45°, движение микрофона прекращают и отмечают его положение. Учащимся поясняют, что в этом случае переменные напряжения, подаваемые на отклоняющие пластины осциллографа с выхода звукового генератора и с микрофонного усилителя, находятся в одинаковой фазе. В свою очередь, это указывает на то, что в пространстве между громкоговорителем и микрофоном укладывается целое число длин волн.

Затем снова продолжают движение микрофона. При этом фаза воспринимаемых микрофоном звуковых волн постепенно ме-

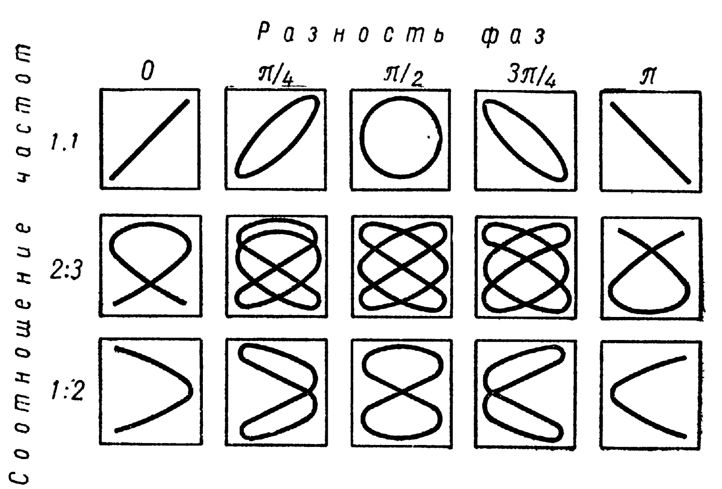


Рис. 1-109 Фигуры Лиссажу.

няется; соответственно изменяется и разность фаз электрических колебаний, снимаемых с выхода звукового генератора и с микрофонного усилителя. Это приводит к постепенному изменению вида фигуры на экране. Когда фигура вновь превратится в прямую линию, наклоненную к горизонтальной оси под углом 45°, движение микрофона прекращают. Измеряют демонстрационным метром расстояние перемещения микрофона, которое равно длине звуковой волны. Умножая найденную величину на частоту звука, отсчитанную по шкале звукового генератора, получают скорость звука в воздухе при комнатной температуре. Она оказывается равной примерно 340 м/с.

Для повышения точности измерения микрофон следует передвигать на возможно большее расстояние, чтобы фигуры на экране повторялись несколько раз. Если по каким-либо причинам увеличить перемещение микрофона невозможно, то следует увеличить частоту звука, причем для ускорения расчетов новую частоту лучше взять кратной первоначальной. Во всех случаях отсчет числа поворотов фигуры на экране начинают и заканчивают с момента, когда она имеет вид прямой линии, так как этот момент отмечается довольно точно.

Очевидно, опыт можно поставить и так: изменять только частоту звука, а расстояние между громкоговорителем и микрофоном оставлять неизменным. В этом случае микрофон располагают на таком расстоянии от громкоговорителя, чтобы фигура на экране осциллографа превратилась в прямую линию, наклоненную под углом 45° к горизонтали. Затем медленно увеличивают или уменьшают частоту звукового генератора. При этом вид фигуры на экране осциллографа изменяется так же, как и в случае передвижения микрофона. Изменение частоты прекращают в тот момент, когда фигура повернется один раз и примет

свой первоначальный вид, т. е. прямую линию. Теперь в пространстве между громкоговорителем и микрофоном снова укладывается целое число звуковых волн. Скорость звука будет равна произведению разности частот звукового генератора на расстояние между громкоговорителем и микрофоном. Расстояние измеряют с помощью демонстрационного метра, а частоту отсчитывают по шкале звукового генератора.

С другими методами измерения скорости звука учащихся знакомят, демонстрируя второй фрагмент из учебного кинофильма «Звук».

В этом фрагменте, называемом «Скорость звука», рассматривается один из простых способов измерения скорости звука — с помощью стартового пистолета. Скорость звука сравнивается со скоростью бегуна, поезда, самолета.

ОПЫТ 43. ЗАВИСИМОСТЬ ВЫСОТЫ ТОНА ЗВУКА ОТ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) осциллограф электронный ОЭШ, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) телефон электромагнитный, 5) электропроигрыватель с усилителем низкой частоты, 6) пластинка граммофонная, 7) провода соединительные с наконечниками.

Связь высоты тона звука с частотой колебаний можно продемонстрировать с помощью зубчатой или дисковой сирены (см. рис. 1-98). Однако более выразительно это можно показать с помощью звукового генератора и электронного осциллографа.

Собирают установку по рисунку 1-110. К выходным зажимам звукового генератора (5 Ом) подключают электродинамический громкоговоритель, а параллельно ему — вход вертикального усилителя электронного осциллографа. Заставляют негромко звучать громкоговоритель на частоте 300—500 Гц и настраивают осциллограф так, чтобы на его экране получилось устойчивое и хорошо видимое изображение нескольких синусоид при частоте горизонтальной развертки 30—50 Гц.

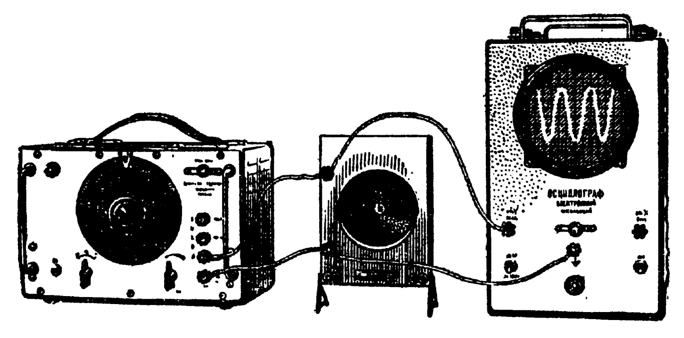


Рис. 1-110. Установка для демонстрации зависимости высоты тона от частоты колебаний.

Затем, поворачивая ручку звукового генератора, медленно изменяют частоту звучания громкоговорителя, начиная от низких частот (20 Гц) и кончая самыми высокими (20 000 Гц). По мере повышения частоты учащиеся слышат повышение тона звука. Одновременно они видят на экране осциллографа увеличение числа синусоид без изменения величины их амплитуды.

При высоких частотах число синусоид увеличивается настолько, что рассмотреть каждую из них становится трудно: издали они сливаются в светящийся четырехугольник. Несмотря на это, частоту развертки оставляют все время постоянной. Такая постановка опыта наглядно убеждает учащихся в том, что высота тона зависит от частоты колебаний звучащего тела. Чем больше частота колебаний, тем выше тон звука.

При демонстрации этого опыта следует иметь в виду, что устойчивое изображение на экране осциллографа наблюдается только в тех случаях, когда частота подводимых к нему электрических колебаний кратна частоте генератора горизонтальной развертки. Во всех остальных случаях изображение смещается то вправо, то влево.

Чтобы устранить это неудобство, частоту звукового генератора следует изменять не плавно, а небольшими скачками, задерживая внимание учащихся лишь на тех моментах, когда изображение на экране остается неподвижным.

После этого на опыте определяют граничные частоты слуха. Для этого снова проходят весь диапазон звукового генератора и просят учащихся заметить для себя момент появления, а затем момент исчезновения звука. Около границ слухового диапазона частоту звукового генератора изменяют медленно, а ее числовые значения каждый раз сообщают учащимся. Очень низкие и очень высокие частоты учащиеся не слышат. Они только видят синусоидальные кривые на экране осциллографа, подтверждающие работу генератора. Таким образом устанавливают, что ухо человека реагирует на механические колебания в широком интервале частот — примерно от 20 до 20 000 Гц, причем границы этого интервала у разных учащихся различны. При этом следует иметь в виду, что интервал слышимых частот зависит также от силы звука, которая применяется в опыте.

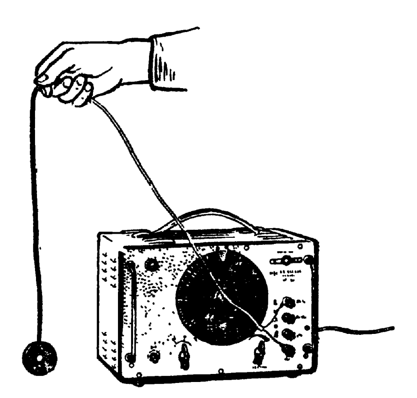


Рис. 1-111. Демонстрация эффекта Допплера.

Далее полезно показать наглядный опыт с граммофонной пластинкой, проигрывая ее с различной скоростью вращения. При увеличении скорости высота тона всех воспроизводимых звуков будет повышаться, а при уменьше-

нии — понижаться. Наконец, демонстрируют зависимость высоты тона от скорости движения источника звука.

К звуковому генератору с помощью длинных и гибких проводов подключают электромагнитный телефон и возбуждают его на частоте примерно 1000 Гц. В течение 15—20 с дают возможность учащимся прислушаться к звучанию покоящегося телефона. После этого его приводят во вращение от руки в вертикальной плоскости с частотой 1—2 об/с (рис. 1-111). Радиус вращения 50—60 см, а плоскость вращения перпендикулярна рядам учащихся — в этом случае телефон то приближается, то удаляется от учащихся.

При вращении телефона учащиеся отмечают периодическое изменение высоты тона звука: при движении телефона в сторону учащихся высота тона повышается, а при движении в обратную сторону — понижается.

Изменение высоты тона при движении источника звука или наблюдателя называют эффектом Допплера.

ОПЫТ 44. СИЛА (ИНТЕНСИВНОСТЬ) И ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) осциллограф электронный ОЭШ, 3) усилитель низкой частоты, 4) микрофон и громкоговоритель электродинамические, 5) гальванометр демонстрационный от амперметра, 6) камертон без резонаторного ящика, 7) молоточек резиновый для возбуждения камертонов, 8) провода соединительные с наконечниками.

Сила, или интенсивность, звука характеризуется, как известно, величиной энергии, проходящей за 1 с через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения звуковых волн. На опыте обычно измеряют не величину энергии, а одну из величин, связанную с силой звука,— скорость колебания частиц среды, или звуковое давление волн. В школьных условиях проще показать принцип измерения второй величины.

Звуковое давление можно измерить с помощью микрофона, в цепь которого включен измерительный прибор. Метод основан на прямой зависимости электродвижущей силы, возникающей в микрофонной цепи, от величины давления звуковых волн, падающих на мембрану микрофона.

Для демонстрации опыта собирают установку по рисунку 1-112. Динамический микрофон включают на вход усилителя низкой частоты, а выход усилителя соединяют с демонстрационным гальванометром, включенным для измерения переменного тока. Перед микрофоном располагают громкоговоритель, включенный на выход звукового генератора. При этом гальванометр обнаруживает ток, величина которого зависит от интенсивности звучания громкоговорителя и расстояния его до микрофона. Обе зависимости поочередно показывают учащимся. Отмечают, что шкалу гальванометра можно проградуировать в единицах силы

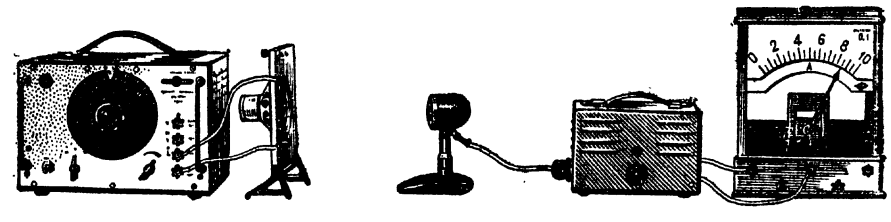


Рис. 1-112. Установка для демонстрации принципа измерения силы звука.

звука и получить, таким образом, измерительный прибор. Затем показывают зависимость силы звука от амплитуды колебания звучащего тела. Для этого в прежней установке производят небольшие изменения: параллельно громкоговорителю включают вход вертикального усилителя электронного осциллографа (рис. 1-113). После этого возбуждают громкоговоритель на частоте 1000—2000 Гц и добиваются устойчивого изображения на экране осциллографа. Размер изображения по вертикали выбирают вначале примерно 2 см, а начальный ток гальванометра — 2 деления шкалы 0—10. Затем, пользуясь регулятором выхода звукового генератора, увеличивают амплитуду синусоиды на экране осциллографа в два, а затем в три раза. При этом ток гальванометра возрастает соответственно в четыре и в девять раз. Из опыта делают вывод: сила звука прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний источника звука.

Наконец, демонстрируют зависимость силы звука от площади излучаемой поверхности. Это проще всего показать с помощью камертона. Звучащий камертон держат в руке. Учащиеся слышат слабый звук. Затем камертон быстро ставят на крышку стола. Звук заметно усиливается, при этом время звучания сокращается.

Кроме объективной оценки силы звука по величине давления звуковых волн или амплитуде колебаний звучащего тела, существует еще субъективная оценка — громкость. Необходимо показать, что сила звука и громкость — понятия неравнозначные,

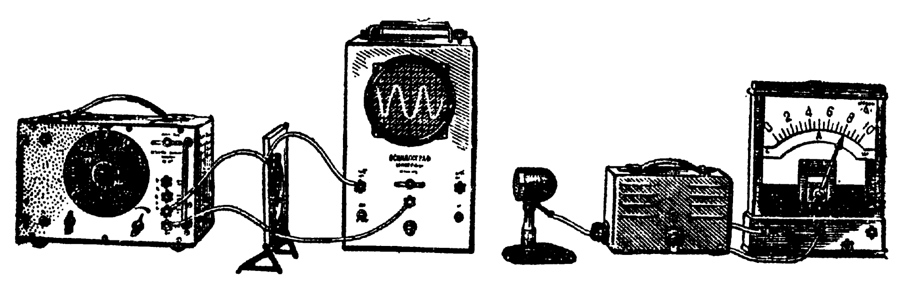


Рис. 1-113. Установка для демонстрации зависимости силы звука от амплитуды колебаний звучащего тела.

Громкость звука, как это следует из только что проделанных опытов, зависит от силы звука. Чем больше сила звука, тем он кажется громче, но связь этих двух величин сложная, и установить ее характер на опыте в школе трудно. Можно только сообщить, что громкость звука пропорциональна не силе звука, а ее логарифму.

Громкость звука зависит также от частоты колебаний источника звука. Для демонстрации этой зависимости собирают установку по рисунку 1-110 и повторяют первую часть предыдущего опыта. Но теперь внимание учащихся обращают не на высоту тона, а на изменение громкости звука. При этом сила звука должна все время оставаться постоянной (последнюю контролируют по амплитуде колебаний на экране осциллографа).

Опыт показывает, что звуки одинаковой силы, но различной частоты ощущаются с различной громкостью. С возрастанием частоты громкость звука вначале постепенно увеличивается, а затем, по мере приближения к частоте 20 000 Гц, быстро уменьшается до нуля. Звуки, лежащие в интервале 1000—3000 Гц, воспринимаются с наибольшей громкостью. Сообщают, что частота 1000 Гц в звуковых измерениях принимается за основную, относительно которой оценивается громкость других звуков.

При постановке описанных опытов желательно брать громкоговоритель малых размеров, так как он хорошо воспроизводит высокие частоты. Это позволяет ярче показать незначительное изменение громкости высоких частот при изменении силы звука. Заменять громкоговоритель телефонной трубкой нельзя: КПД последней сильно зависит от частоты, так как сопротивление телефона носит, главным образом, индуктивный характер.

Если в последнем опыте напряжение звуковой частоты подавать на осциллограф не непосредственно с звукового генератора, а через микрофон, включенный на вход вертикального усилителя осциллографа, то можно сравнить объективно спектральную чувствительность уха и микрофона.

ОПЫТ 45. ЗВУКОВОЙ РЕЗОНАНС

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) громкоговоритель электродинамический, 3) телефон электромагнитный, 4) камертоны на резонаторных ящиках, 5) цилиндр измерительный или неградуированный на 1000 мл, 6) шарик стальной на нити, 7) штатив универсальный, 8) молоточек резиновый для возбуждения камертонов.

Два одинаковых камертона на резонаторных ящиках располагают на расстоянии 20—30 см так, чтобы отверстия ящиков были обращены друг к другу. Ударом резинового молоточка возбуждают один из камертонов и через 3—5 с рукой гасят колебания. Учащиеся слышат звук, который издает второй камертон, возбудившись вследствие резонанса.

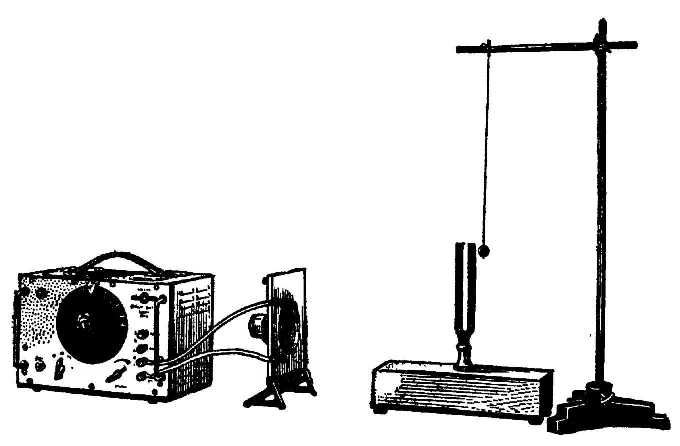


Рис. 1-114. Возбуждение камертона громкоговорителем.

Расстраивают камертоны, надев на ветвь одного из них резиновое колечко. Повторяют опыт и убеждаются в отсутствии звучания второго камертона.

Выразительность опыта значительно увеличивается, если один из камертонов заменить громкоговорителем, возбуждаемым от звукового генератора. Громкоговоритель располагают около открытого конца резонаторного ящика на расстоянии 10—15 см. К камертону приближают маленький стальной шарик, подвешенный на нити длиной 40—50 см (рис. 1-114). Ручку регулятора выхода звукового генератора ставят на максимум и плавно изменяют высоту тона. Когда частота звука от громкоговорителя будет близка к собственной частоте колебаний камертона, возникает явление резонанса. Его обнаруживают по резкому усилению громкости звука, по отскакиванию стального шарика от ветви камертона или по звучанию камертона, если выключить громкоговоритель.

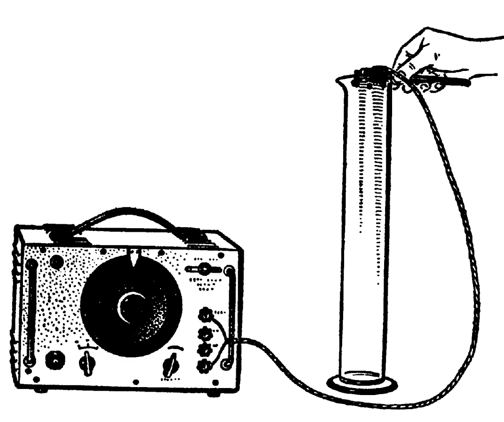


Рис. 1-115. Возбуждение воздушного столба телефоном.

Далее демонстрируют резонанс воздушного столба, заключенного в стеклянном цилиндре. К открытому концу цилиндра подносят телефон, возбужденный звуковым генератором (рис. 1-115). Плавно увеличивая частоту генератора, наблюдают многократное усиление звука.

Таким образом, используя явление резонанса, на

опыте устанавливают наличие у воздушного столба основного тона и обертонов, частота которых в целое число раз больше частоты основного тона.

Последний опыт можно демонстрировать иначе. Телефон возбуждают на частоте 1500—2000 Гц и в горизонтальном положении медленно опускают, а затем поднимают из стеклянного цилиндра. Учащиеся слышат то усиление, то ослабление звука.

Повторяют опыт при другом тоне звука и замечают, что с увеличением частоты число максимумов звука возрастает. Обращают внимание учащихся на возможность измерения длины звуковой волны, а также собственной частоты колебаний тела методом резонанса.

ОПЫТ 46. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) громкоговорители электродинамические — 2 шт., 3) усилитель низкой частоты, 4) микрофон электродинамический, 5) гальванометр демонстрационный от амперметра, 6) метр демонстрационный, 7) провода соединительные с наконечниками.

Два одинаковых громкоговорителя устанавливают на расстоянии 1—1,5 м от микрофона, соединенного с демонстрационным гальванометром через усилитель низкой частоты (рис. 1-116). К звуковому генератору подключают первый громкоговоритель и возбуждают его на частоте 1000 Гц. Гальванометр обнаруживает ток. Пользуясь регулятором усилителя низкой частоты, подбирают выходной ток такой величины, чтобы стрелка гальванометра отклонилась примерно до половины шкалы 0—10.

Затем выключают первый громкоговоритель и включают второй. Гальванометр должен показать ток прежней величины. После этого включают параллельно оба громкоговорителя и наблюдают увеличение тока примерно в два раза. Если при этом ток уменьшается, то следует поменять концы проводов у одного из громкоговорителей, чтобы их диффузоры колебались в одинаковых фазах. Обратив внимание учащихся на когерентность источников звука, приступают к демонстрации опыта.

Один из громкоговорителей медленно приближают к микрофону и наблюдают периодическое изменение величины тока. Когда расстояние между громкоговорителями (оно равно разности

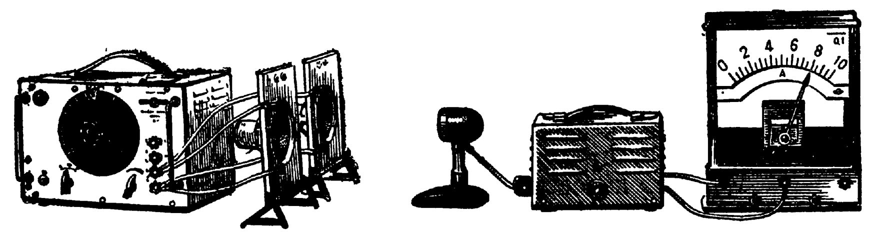


Рис. 1-116. Установка для демонстрации интерференции звуковых волн.

хода волн) будет равно нечетному числу полуволн, ток в цепи микрофона уменьшается до нуля. Когда же разность хода волн становится равной четному числу полуволн, ток достигает наибольшей величины; обе волны в этом случае достигают микрофона в одинаковых фазах и при сложении усиливают друг друга. При частоте 1000 Гц максимумы и минимумы чередуются примерно через 17 см, т. е. через половину длины волны звука в воздухе.

Расстояние между громкоговорителями измеряют для каждого случая с помощью демонстрационного метра. Зная это расстояние и частоту звука, можно определить скорость звука в воздухе, на что обращают внимание учащихся.

Интерференцию звуковых волн можно демонстрировать на слух. Громкоговорители поворачивают в сторону класса и один из них медленно передвигают поперек демонстрационного стола, то приближая, то удаляя от аудитории. При этом учащиеся слышат (лучше одним ухом, закрыв второе рукой) то усиление, то ослабление громкости звука. Можно оба громкоговорителя оставить неподвижными, а учащимся предложить медленно наклоняться то вправо, то влево, закрыв одно ухо рукой. При движении они обнаруживают зоны усиления и ослабления звука. Полезно повторить опыт с одним звучащим громкоговорителем, чтобы учащиеся убедились в отсутствии интерференционных зон.

Лучший эффект получается с простыми звуками небольшой мощности. При большой мощности могут возникнуть звуки от дополнительных колебаний диффузоров громкоговорителей, что приведет к образованию лишних максимумов и минимумов звука. К тому же интерференционная картина может осложниться и за счет наложения звукового поля стоячих волн. Наивыгоднейшая частота подбирается опытным путем в диапазоне от 1000 до 3500 Гц.

ОПЫТ 47. ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) усилитель низкой частоты, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) телефон электромагнитный, 5) микрофон электродинамический, 6) гальванометр демонстрационный от амперметра, 7) экран из фанеры размером 30×50 см, 8) зеркало сферическое вогнутое на подставке, 9) провода соединительные с наконечниками, 10) кинофильм «Звук», 11) кинопроектор.

На вход усилителя низкой частоты включают микрофон, а на выход — демонстрационный гальванометр для измерения переменного тока (рис. 1-117). Выход звукового генератора (5 Ом) соединяют с громкоговорителем. Микрофон и громкоговоритель располагают друг от друга на расстоянии 1 м и развертывают так, чтобы оси их пересекались у края демонстрационного стола.

Возбуждают громкоговоритель на частоте 1000—2000 Гц и убеждаются в отсутствии приема звука микрофоном. Если галь-

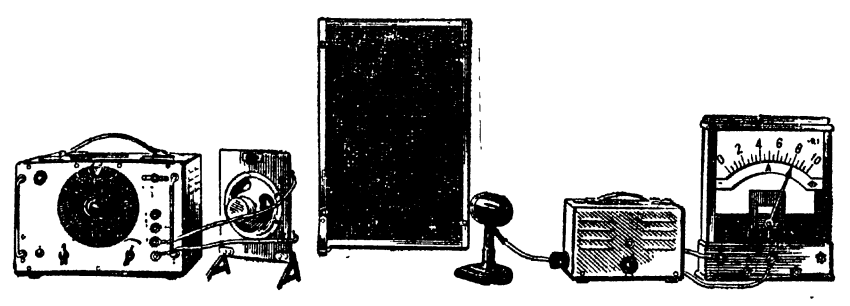


Рис. 1-117. Демонстрация отражения звуковых волн от плоского экрана.

ванометр обнаруживает слабый ток, то микрофон немного перемещают на столе, добиваясь исчезновения тока (помещают в узел давления образовавшейся в классе стоячей волны).

На краю стола ставят плоский экран и медленно поворачивают его вокруг вертикальной оси. При некотором положении экрана отраженные волны попадают в микрофон и гальванометр обнаруживает ток. В момент наибольшего тока положение экрана фиксируют и отмечают равенство углов падения и отражения звуковых волн. Опыт повторяют при частоте 5000—6000 Гц и убеждаются, что с повышением частоты направленность отражения звука возрастает: даже незначительный поворот экрана приводит к резкому изменению величины тока.

Затем экран покрывают какой-либо мягкой тканью и убеждаются, что отражение звука заметно ухудшается; два слоя ткани еще больше поглощают звук. Поглощение возрастает также с увеличением частоты звука.

После этого демонстрируют отражение звука от вогнутого зеркала. На расстоянии 1—1,5 м от громкоговорителя, возбужденного на частоте 4000—5000 Гц, располагают вогнутое зеркало, а между ними—микрофон, обращенный к зеркалу (рис.1-118). Наблюдают слабый прием звука при средней громкости звучания громкоговорителя.

Медленно передвигают микрофон к зеркалу и наблюдают постепенное увеличение тока в цепи гальванометра. Когда микро-

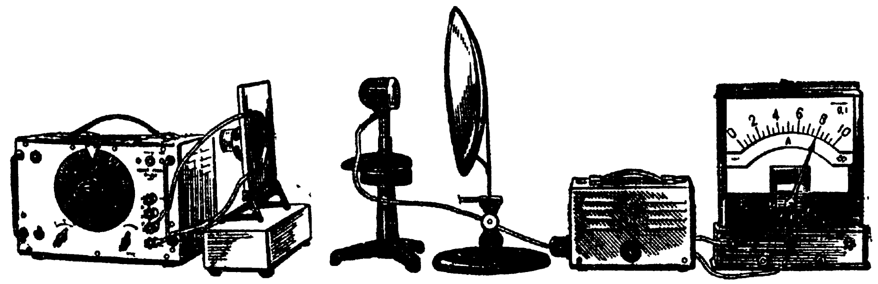


Рис. 1-118. Установка для демонстрации отражения звуковых волн от вогнутого зеркала.

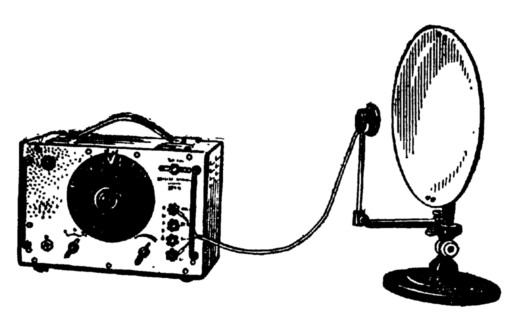


Рис. 1-119. Звуковой прожектор.

фон окажется в фокусе зеркала, ток достигает максимального значения. При дальнейшем перемещении микрофона ток снова убывает. Опыт доказывает, что звуковые волны, отражаясь от вогнутой поверхности зеркала, собираются в его фокусе.

В этом опыте следует учесть, что микрофон при движении может попасть в пучность образовавшейся стоячей волны, где интенсивность звука так же, как и в фокусе, повышена. Чтобы не смешивать фокус зеркала с пучностью стоячей волны, надо обратить внимание на величину интенсивности звука: в пучности она заметно меньше, чем в фокусе.

Далее демонстрируют направленное излучение звука. В фокусе зеркала укрепляют телефон и возбуждают его от звукового генератора на частоте 3000—5000 Гц (рис. 1-119). Затем поворачивают зеркало вокруг вертикальной оси, облучая звуковым прожектором учащихся.

В заключение демонстрируют третий фрагмент «Отражение звука» из учебного кинофильма «Звук».

В этом фрагменте показываются акустические лаборатории МГУ, а также акустические приборы, позволяющие увидеть звуковые волны. В конце фрагмента рассматривается явление реверберации звука и его практическое значение.

ОПЫТ 48. СТОЯЧИЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) усилитель низкой частоты, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) микрофон электродинамический, 5) гальванометр демонстрационный от амперметра, 6) экран плоский размером 30×50 см, 7) метр демонстрационный, 8) провода соединительные с наконечниками.

Перед громкоговорителем на расстоянии 1—1,5 м устанавливают плоский экран из фанеры, а между ними — микрофон, соединенный через усилитель низкой частоты с демонстрационным гальванометром (рис. 1-120).

Громкоговоритель подключают к звуковому генератору и слабо возбуждают его на частоте 1000 Гц. Звуковые волны, дойдя до экрана, отражаются, и в результате интерференции прямой и обратной волны образуются стоячие волны. Для выявления узлов и пучностей медленно перемещают микрофон от громкоговорителя к экрану или в обратном направлении. Учащиеся наблюда-

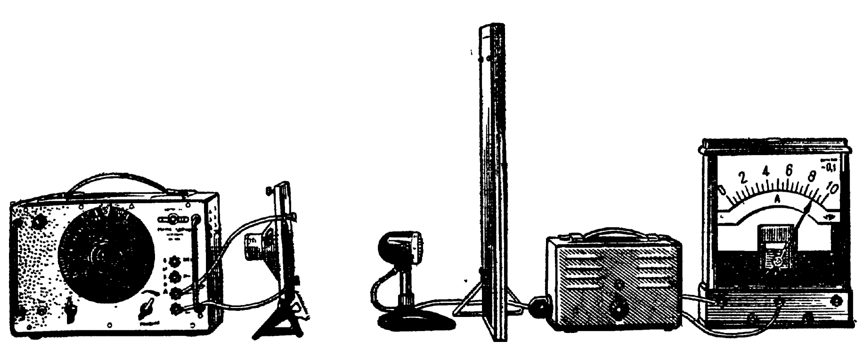


Рис. 1-120. Демонстрация стоячих звуковых волн в воздухе.

ют за показаниями гальванометра и отмечают периодическое изменение величины тока.

Когда микрофон попадает в пучность волны, гальванометр показывает малый ток; когда же микрофон оказывается в узле — величина тока резко возрастает (в узле колебания звукового давления больше). При частоте звука 1000 Гц узлы и пучности чередуются примерно через 8—9 см.

Измеряют расстояние между двумя соседними узлами или пучностями с помощью демонстрационного метра. Зная длину стоячей волны и частоту колебаний, вычисляют скорость звука в воздухе и сравнивают ее с результатами, полученными в предыдущих опытах (см. опыты 42 и 46).

Опыт полезно повторить при частоте 2000 Гц. В этом случае длина стоячей волны будет в два раза меньше.

Далее демонстрируют образование стоячих волн во всей аудитории. Громкоговоритель поворачивают в сторону класса и сильно возбуждают его на частоте 2000—3000 Гц. Затем медленно перемещают микрофон над демонстрационным столом. Стрелка гальванометра совершает периодические колебания, отмечая узлы и пучности стоячих волн.

Образовавшиеся в аудитории стоячие волны можно обнаружить на слух. Учащимся предлагают закрыть одно ухо рукой и медленно наклоняться то вправо, то влево. Узлы и пучности легко обнаруживаются по изменению громкости звука. Такой же результат получается, если учащиеся сидят неподвижно, а перемещается на столе только громкоговоритель.

ОПЫТ 49. ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Оборудование: 1) генератор звуковой школьный, 2) усилитель низкой частоты, 3) громкоговоритель и микрофон электродинамические, 4) гальванометр демонстрационный от амперметра, 5) экраны из фанеры размером 30×50 см — 2 шт., 6) ящик из картона или фанеры без крышки размером 14×14×10 см, 7) провода соединительные с наконечниками.

Между громкоговорителем и микрофоном, находящимися на расстоянии 50—80 см друг от друга, устанавливают экран

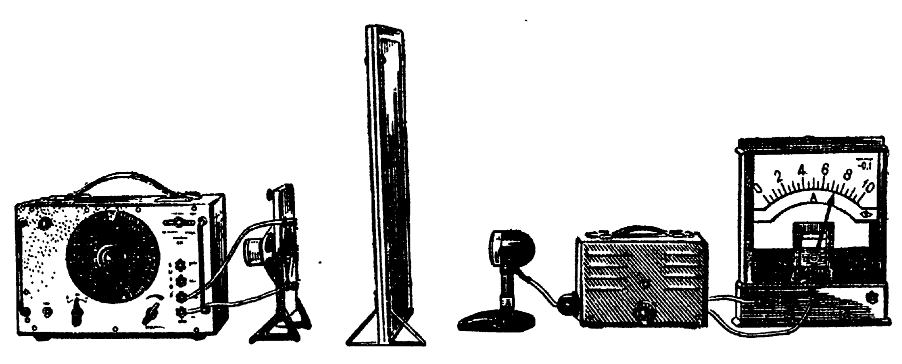


Рис. 1-121. Демонстрация дифракции звуковых волн на экране.

(рис. 1-121). Громкоговоритель подключают к звуковому генератору, а микрофон — через усилитель низкой частоты к демонстрационному гальванометру.

Возбуждают громкоговоритель на частоте 200—300 Гц и отмечают появление тока в микрофонной цепи, что свидетельствует о «загибании» звуковых волн за края экрана.

Увеличивают частоту звука до 5000—6000 Гц и наблюдают резкое ослабление приема звука. Медленно перемещают микрофон за экраном и обнаруживают звуковую тень.

Заменяют широкий экран узким, например книгой, и убеждаются в отсутствии звуковой тени.

Возбуждают громкоговоритель на частоте 5000—6000 Гц и пододвигают к микрофону на расстояние 40—50 см. Около микрофона ставят два одинаковых экрана так, чтобы между ними образовалась щель шириной 2—3 см (рис. 1-122). Медленно перемещают микрофон вокруг щели и обнаруживают дифракционное загибание звуковых волн в область геометрической тени.

Возбуждают громкоговоритель на частоте 300—400 Гц; замечают громкость звучания и величину тока в микрофонной цепи. Затем приставляют к громкоговорителю с двух сторон экраны, как показано на рисунке 1-123. Громкость звука и величина

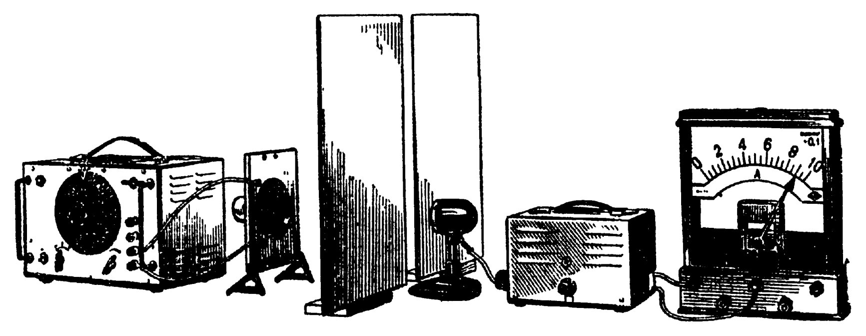


Рис. 1-122. Демонстрация дифракции звуковых волн на щели.

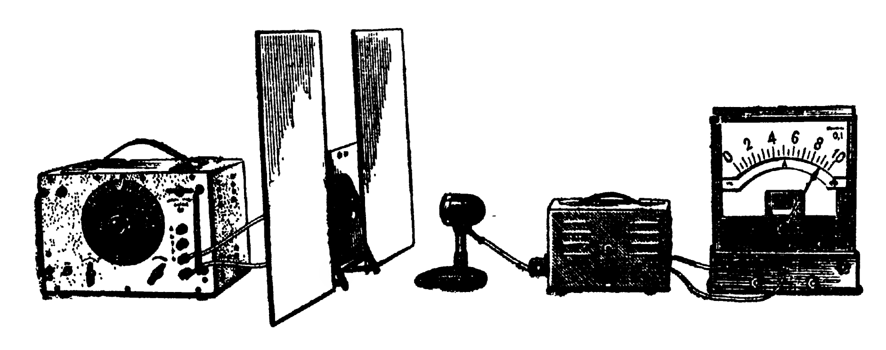


Рис. 1-123. Демонстрация ослабления дифракции у громкоговорителя экранами.

тока заметно возрастают вследствие того, что экраны уменьшают возможность встречи волнам противоположных фаз, возникающим у обеих сторон диффузора громкоговорителя.

Не меняя установки, возбуждают громкоговоритель на частоте 150—200 Гц. Теперь длина волны становится больше размера экранов. Громкость звука и величина тока уменьшаются вследствие дифракции. Убирают экраны — звук становится еще тише. Это явление называют акустическим коротким замыканием.

На основании проделанных опытов делают вывод: громкоговоритель лучше излучает высокие частоты, чем низкие, так как для длинных волн выравнивание давления около диффузора вследствие дифракции сказывается сильнее.

Опыт раскрывает назначение ящиков у радиоприемников, магнитофонов и радиол как средства борьбы с дифракцией звука.

Можно подкрепить последний вывод следующим опытом. Микрофон располагают на расстоянии 15—20 см сбоку громкоговорителя, возбужденного на частоте 500—800 Гц. Замечают начальную громкость звука и величину тока в гальванометре. Затем заднюю сторону диффузора закрывают картонным ящиком (рис. 1-124). Громкость звука и величина тока в микрофонной цепи резко увеличиваются. Удаляют ящик — громкость звука и величина тока уменьшаются вследствие интерференции волн, излучаемых противоположными сторонами диффузора.

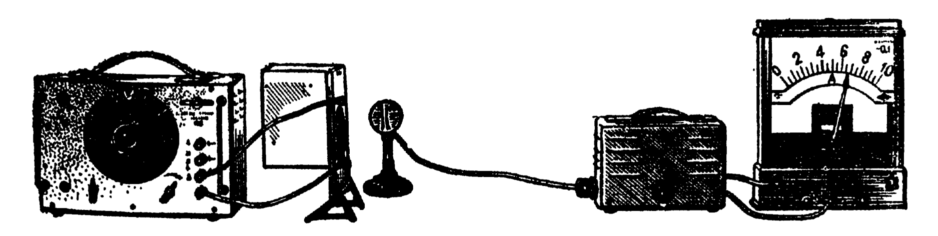


Рис. 1-124. Демонстрация назначения ящика у громкоговорителя.

После этого громкоговоритель возбуждают на частоте 4000—6000 Гц и обнаруживают обратный эффект: при открытом диффузоре громкость звука увеличивается, а при закрытом — уменьшается. Явление объясняют тем, что при высокой частоте уменьшается дифракция и акустическое короткое замыкание звуковых волн. Кроме того, при открытом диффузоре звук излучается двумя противоположными поверхностями, а при закрытом — лишь одной.

ОПЫТ 50. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

Оборудование: 1) комплект приборов для магнитной записи и воспроизведения звука, 2) микрофон электродинамический, 3) усилитель низкой частоты, 4) громкоговоритель электродинамический, 5) сердечник от универсального трансформатора с полюсными наконечниками и катушкой на напряжение 220 В, 6) гальванометр демонстрационный от вольтметра, 7) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 8) выключатель однополюсный, 9) магнит постоянный, 10) петля из магнитофонной ленты длиной 1—1,5 м, 11) линейка металлическая длиной 500 мм, 12) провода экранированные с наконечниками, 13) штатив универсальный.

В настоящее время известны три способа записи звука: механический, оптический и магнитный. Последний из них легко осуществить в школе. Для этого применяют комплект из трех простых приборов, показанных на рисунке 1-125.

Лентопротяжный механизм *1* смонтирован на гетинаксовой панели размером 80×100 мм. Он представляет собой барабан диаметром 60 мм и толщиной 18 мм, насаженный на ось синхронного электродвигателя. Мощность электродвигателя 12 Вт, питается он от сети переменного тока напряжением 220 В, делает 60 об/мин и обеспечивает равномерное движение магнитофонной ленты со скоростью 19 см/с. Это соответствует скорости движения ленты в обычном магнитофоне.

На лицевой стороне панели расположены тянущий барабан и зажимы электродвигателя, а на обратной стороне — электродвигатель и металлический стержень для крепления панели в муфте штатива.

На второй панели *2* размером 80×70 мм смонтированы универсальная магнитная головка от магнитофона, два направляющих металлических ролика и выходные зажимы. Панель имеет короткий стержень для крепления в муфте штатива.

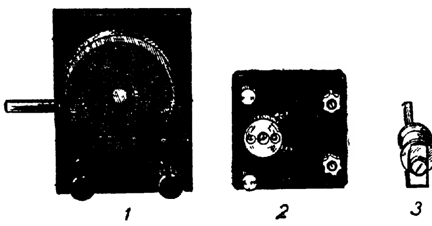
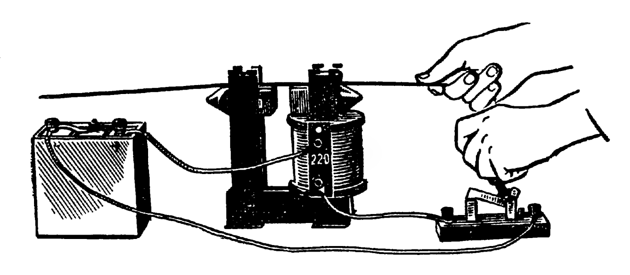


Рис. 1-125. Комплект приборов для магнитной звукозаписи:

1 — лентопротяжный механизм; *2* — универсальная магнитная головка; *3* — натяжной ролик.

Натяжной ролик *3* удерживается в металлической скобе и может свободно вращаться вокруг своей оси. К скобе припаяна упругая

Рис. 1-126. Магнитная запись электрических импульсов на стальной линейке.



пластинка, обеспечивающая равномерное натяжение ленты. Вначале рекомендуется показать простой опыт, раскрывающий принцип действия магнитной головки. Для этого собирают установку по рисунку 1-126.

На железный сердечник от универсального трансформатора надевают катушку на напряжение 220 В, а на верхние концы сердечника кладут полюсные наконечники так, чтобы между ними образовался воздушный зазор 10—15 мм. Катушку соединяют через выключатель с батареей аккумуляторов 3-НКН-10.

На полюсные наконечники кладут металлическую линейку и поясняют учащимся, что в собранной установке электромагнит моделирует магнитную головку, а линейка — ферромагнитную ленту. Затем линейке сообщают от руки равномерное движение и, пока она проходит над полюсными наконечниками, два-три раза замыкают электрическую цепь. В эти моменты линейка сильно намагничивается.

Чтобы обнаружить записанные на линейке электрические импульсы, отключают катушку от аккумулятора и соединяют ее с демонстрационным гальванометром.

Вновь протягивают линейку над полюсными наконечниками и наблюдают импульсы тока в цепи гальванометра.

После этого приступают к демонстрации записи и воспроизведения звука. Собирают установку по рисунку 1-127. Внизу стойки универсального штатива укрепляют панель с лентопротяжным механизмом, примерно в середине — панель с магнитной головкой и на верхнем конце — натяжной ро-

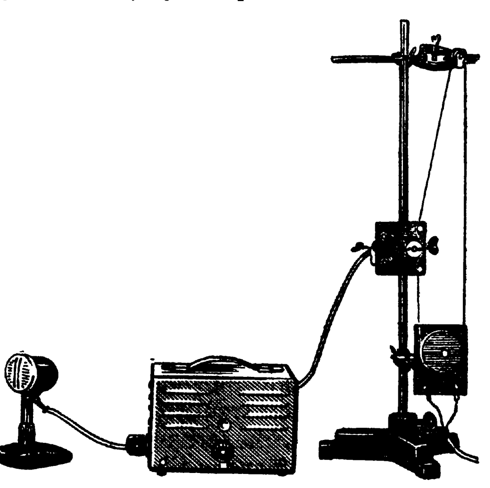


Рис. 1-127. Установка для записи звука на магнитной ленте.

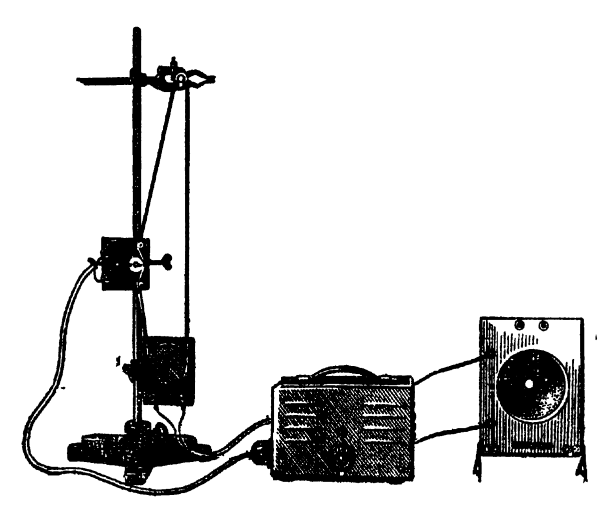


Рис. 1-128. Установка для воспроизведения звука.

лик. Заправляют ферромагнитную ленту. При этом следят за тем, чтобы лента прижималась к головке рабочим слоем (матовой поверхностью), не имела перекоса и была слегка натянута.

Для записи звука магнитную головку подключают экранированными проводами к выходу усилителя низкой частоты, на вход усилителя включают динамический микрофон и приводят ленту в движение. Микрофон устанавливают возможно дальше от установки. Необходимый уровень записи подбирают поворотом ручки регулятора громкости усилителя и изменением расстояния между диктором и микрофоном. Запись продолжают в течение одного оборота ферромагнитной ленты.

Учащимся кратко поясняют происходящие явления. Переменное электрическое напряжение, возникающее в микрофоне, усиливается усилителем низкой частоты и подается в обмотку магнитной головки, в результате чего в зазоре ее сердечника возникает переменное магнитное поле звуковой частоты. Это поле намагничивает движущуюся ленту в соответствии с величиной напряжения на входе усилителя. Таким образом, на ленте остается звуковой след в форме переменной намагниченности.

Для воспроизведения звука магнитную головку подключают на вход усилителя низкой частоты, а к выходу — громкоговоритель (рис. 1-128).

Теперь намагниченная лента, проходя мимо зазора головки, создает в ее обмотке переменную электродвижущую силу, меняющуюся в соответствии с записанным звуком. После усиления звук воспроизводится громкоговорителем.

Стирают запись с помощью постоянного магнита, который прикладывают к движущейся ленте одним полюсом.

ОПЫТ 51. ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Оборудование: 1) генератор ультразвуковой УД-1 с набором принадлежностей, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) аппарат проекционный, 4) экран, 5) линейка прозрачная с миллиметровыми делениями, 6) вода, глицерин, крахмал, 7) кинофильм «Ультразвук и его применение в технике», 8) кинопроектор.

Излучатель ультразвука устанавливают на подъемном столике проекционного аппарата, как показано на рисунке 1-129. На крышку излучателя ставят кювету с плоскопараллельными стенками из органического стекла, наполненную водой. Поверхность излучателя предварительно смазывают трансформаторным или вазелиновым маслом так, чтобы между излучателем и дном кюветы не осталось воздушных пузырьков, иначе ультразвук не попадает в кювету. Затем с помощью объектива получают на экране четкое изображение поверхности воды. Желательно воспользоваться оборотной призмой, чтобы иметь прямое изображение.

Пьезоэлектрический излучатель подключают к ультразвуковому генератору и, медленно вращая ручку «Подстройка частоты», добиваются совпадения частоты генератора с частотой собственных колебаний пьезопластинки. В этот момент на поверхности воды возникает хорошо заметная рябь или даже волнение, что и доказывает наличие колебаний у пьезопластинки.

Можно получить ультразвуковые колебания большой мощности. Для этого излучатель следует погрузить в широкую кювету *1* (см. рис. 1-72) с глицерином или другой какой-либо изолирующей жидкостью и по-прежнему возбуждать пьезопластинку на собственной частоте.

Картину ультразвуковых волн в жидкости можно сделать видимой. Для этого в кювету с водой добавляют небольшое количество крахмала (0,3 г крахмала на 10 мл воды). Подъемный столик устанавливают так, чтобы поверхность излучателя была строго параллельна свободной поверхности жидкости. Размешивают воду и включают генератор. Вследствие отражения волн от поверхности воды в кювете образуются плоские стоячие волны, показанные на рисунке 1-130, *а*. Темные полосы соответствуют узлам, так как в них концентрируются частицы крахмала, а светлые — пучностям.

Для измерения длины стоячей волны в кювету помещают прозрачную линейку с миллиметровыми делениями и проецируют вместе

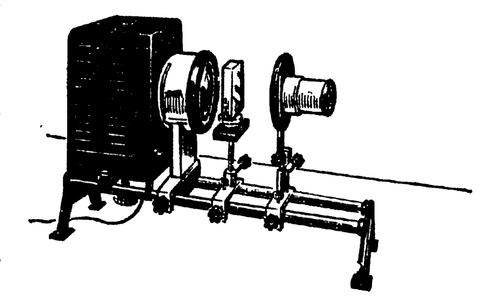


Рис. 1-129. Установка излучателя с кюветой в проекционном аппарате.

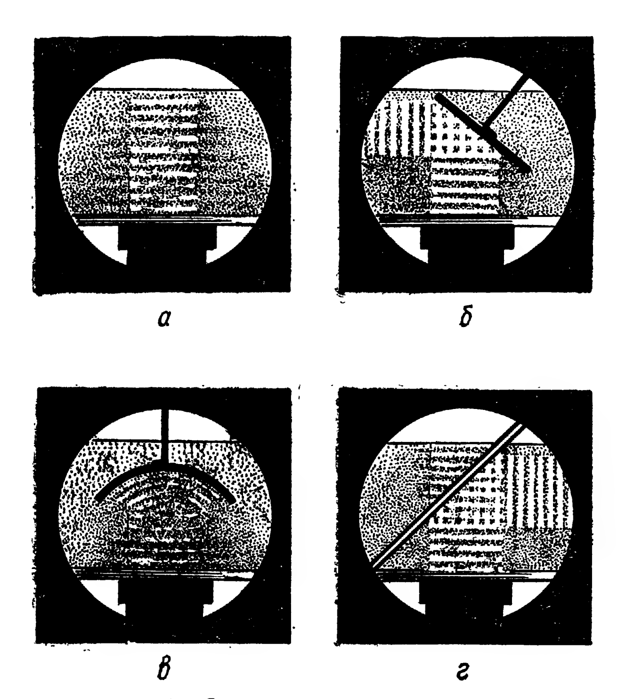


Рис. 1-130. Отражение ультразвуковых волн:

а — от поверхности жидкости; *б* — от плоской пластинки, поставленной под углом; *в* — от вогнутой пластинки; *г* — при прохождении через плоскопараллельную пластинку.

с волнами на экран. Зная длину стоячей волны и скорость распространения звука в воде, легко рассчитать частоту колебаний пластинки.

Для ознакомления учащихся с другими способами получения ультразвука демонстрируют первый фрагмент «Ультразвук и его получение» из учебного кинофильма «Ультразвук и его применение в технике»[1]. В этом фрагменте показаны: пьезоэлектрический эффект, явление электрострикции, кварцевый излучатель, явление магнитострикции и работа магнитострикционного излучателя.

ОПЫТ 52. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКА

Оборудование: то же, что и в опыте 51.

Собирают установку (см. рис. 1-129), описанную в предыдущем опыте, и демонстрируют следующие основные свойства ультразвука:

---

[1] Ультразвук и его применение в технике. Ленинградская студия научно-популярных фильмов, 1963, 2 ч. Продолжительность демонстрации — 20 мин.

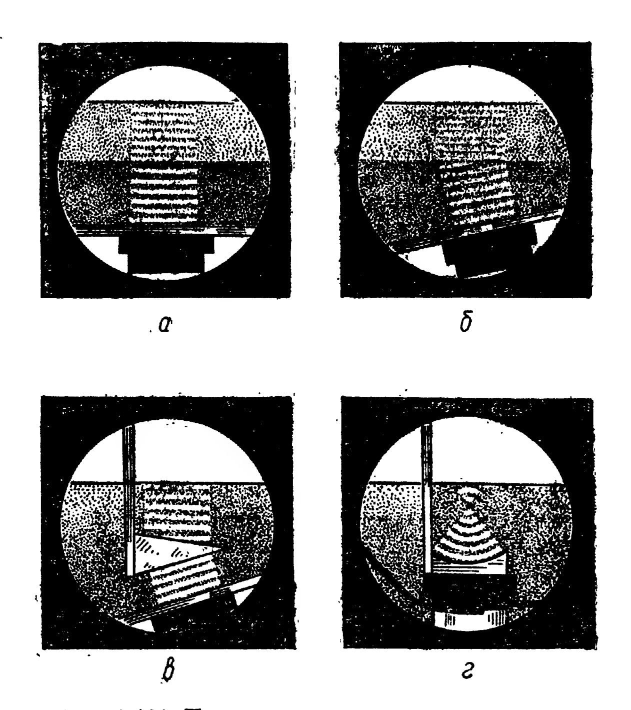


Рис. 1-131. Преломление ультразвуковых волн:
а — на границе двух сред при нормальном падении; *б* — то же при падении под углом: *в* — в призме; *г* — в линзе.

Отражение волн. В кювету с водой и разведенным в ней крахмалом вносят плоскую металлическую пластинку и располагают ее под углом 45° к поверхности воды. Включают ультразвуковой генератор и добиваются образования стоячих волн, как показано на рисунке 1-130, *б*. Стоячие волны получаются в результате отражения волн от внесенной пластинки и стенки кюветы.

В этом опыте учащиеся одновременно наблюдают и интерференцию волн.

Затем в кювету вносят металлическую пластинку, имеющую форму цилиндрического вогнутого зеркала. На экране наблюдают отражение круговых волн, сходящихся в главном фокусе зеркала (рис. 1-130, *в*). Если в кювету внести плоскопараллельную пластинку из органического стекла и расположить ее под углом 45° к поверхности воды, то можно наблюдать одновременно два явления — отражение и преломление волн (рис. 1-130, *г*).

Преломление волн. В кювету наливают глицерин, а затем такое же количество воды, причем в обе жидкости предварительно добавляют немного крахмала. На экране наблюдают образование стоячих волн одновременно в обеих жидкостях (рис. 1-131, *а*).

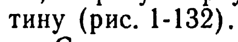
При переходе ультразвуковых волн через границу раздела двух жидкостей наблюдается изменение длины стоячей волны. В глицерине длина стоячей волны получается больше, чем в воде, примерно в 1,3 раза, что объясняется различием скорости распространения ультразвука в указанных жидкостях.

Чтобы наблюдать явление преломления волн, ультразвук направляют на границу двух жидкостей под некоторым углом. Для этого кювету вместе с излучателем слегка наклоняют в плоскости, перпендикулярной оптической оси проекционного аппарата (рис. 1-131, *б*). Угол наклона подбирают так, чтобы в обеих жидкостях образовалась четкая картина стоячих волн.

Затем в кювету наливают одну дистиллированную воду с небольшой примесью крахмала и вносят призму из органического стекла. Призму располагают в кювете так, чтобы ее нижняя грань была параллельна поверхности излучателя. Кювету с излучателем немного наклоняют в сторону и добиваются образования стоячих волн, как показано на рисунке 1-131, *в*. Волны, пройдя призму, изменяют свое направление, отклоняясь от основания призмы вследствие того, что скорость ультразвука в органическом стекле больше, чем в воде.

Чтобы наблюдать преломление волн в линзе, установку немного изменяют. Излучатель погружают на дно широкой кюветы, наполненной водой с примесью крахмала. На крышку излучателя ставят плоско-вогнутую линзу, как показано на рисунке 1-131, *г*. Ультразвуковые волны, пройдя через линзу, собираются в ее фокусе. Если фокус окажется на поверхности воды, то при достаточной мощности ультразвука в кювете образуется фонтан.

Дифракция волн. Опыт демонстрируют с помощью двух не проницаемых для ультразвука пластинок из пенопласта. Пластинки опускают в кювету с водой и крахмалом на глубину 20—30 мм и располагают так, чтобы между ними образовалась щель шириной 2—3 мм. Включают генератор и наблюдают на экране, как волны полностью задерживаются пластинкой и проходят только через щель, образуя яркую дифракционную картину (рис. 1-132).



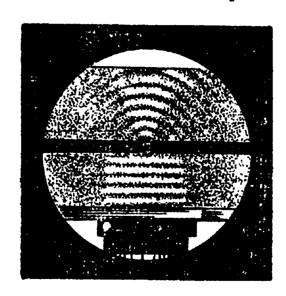


Рис. 1-132. Дифракция ультразвуковых волн на щели.

С целью повторения изучаемого материала учащимся демонстрируют второй фрагмент — «Физические свойства ультразвука» — из учебного кинофильма «Ультразвук и его применение в технике», где показывается зависимость затухания ультразвуковых волн от упругости среды, прямолинейность распространения ультразвука в однородной среде, отражение от границы двух разных сред, фокусировка ультразвука и образование ультразвукового фонтана.

ОПЫТ 53. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Оборудование: то же, что и в опыте 51.

Собирают установку по рисунку 1-129 и демонстрируют в проекции на экране следующие опыты:

Дегазация жидкости. На крышку излучателя ультразвука, предварительно покрытую тонким слоем трансформаторного масла, ставят кювету с дистиллированной водой. Включают генератор и наблюдают на экране образование пузырьков воздуха, которые, соединяясь в более крупные, поднимаются на поверхность и выходят из воды.

Учащимся сообщают, что подобным образом производится дегазация жидкого стекла и расплавленного металла.

Коагуляция частиц. В кювету с водой добавляют крахмал (3 г крахмала на 10 мл воды) и тщательно перемешивают. После включения генератора наблюдают, как частицы крахмала собираются в узлах стоячих волн и после выключения генератора падают вниз, очищая воду.

Затем на дно кюветы, напротив излучателя, ставят вогнутое цилиндрическое зеркало (рис. 1-133, *а*). Теперь коагуляция крахмала наблюдается только в небольшом объеме, заключенном между дном кюветы и зеркалом.

Учащимся сообщают, что ультраакустическую коагуляцию широко применяют для очистки газов, осаждения частиц сажи и цветных металлов.

Принцип ультразвуковой дефектоскопии. Опыт демонстрируют следующим образом. В кювету с водой и крахмалом вносят исследуемую деталь — брусочек из органического стекла размером 40×9×5 мм, в боковой стенке которого сделано поперечное отверстие, заклеенное с обеих сторон целлофаном (рис. 1-133, *б*). Брусочек располагают в кювете горизонтально, напротив излучателя ультразвука. Настраивают генератор на собственную частоту колебаний пьезопластинки и добиваются возникновения стоячих волн. При этом замечают, что стоячие волны образуются только за сплошными участками брусочка. За отверстием же наблюдается ультразвуковая тень, так как ультразвук отражается от воздушного пузырька в брусочке и рассеивается. Наличие тени показывает, что исследуемая деталь имеет «раковину».

Затем медленно перемещают брусочек в горизонтальном направлении и наблюдают исчезновение ультразвуковой тени, как только отверстие в брусочке выйдет из ультразвукового пучка.

Ускорение диффузии. В кювету с чистой водой осторожно наливают (через стеклянную трубочку, опущенную до дна) крепкий раствор марганцовокислого калия. Воду подвергают воздействию ультразвука и наблюдают ускорение диффузии. Под действием ультразвукового потока окрашенный раствор марганцовокислого калия поднимается со дна кюветы и перемешивается с водой.

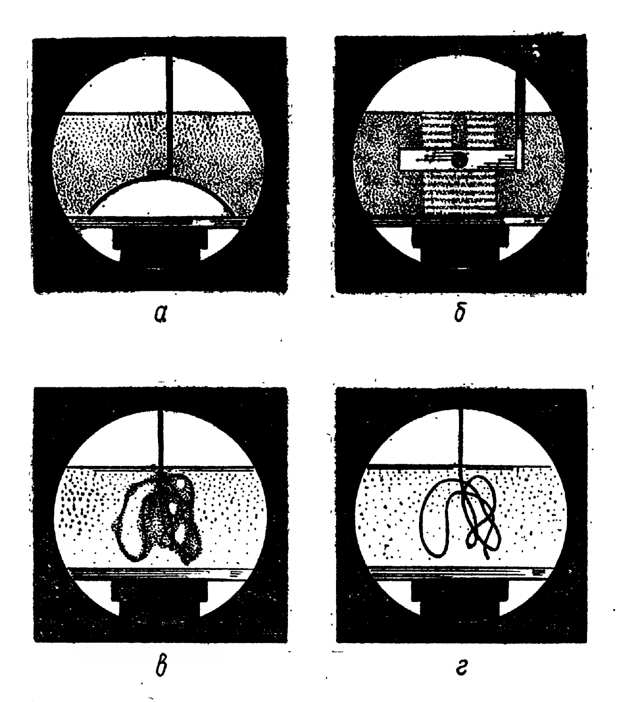


Рис. 1-133. Практические применения ультразвука:
а — коагуляция частиц крахмала; *б* — дефектоскопия методом сквозного прозвучивания; *в* и *г* — очистка проводов.

Очистка металлических изделий. Кусок тонкого провода свертывают в пучок, покрывают вазелином и опускают в кювету с бензином или метиловым спиртом (рис. 1-133, *в*). Включают генератор и наблюдают, как частицы вазелина отрываются от провода и уносятся ультразвуковым потоком. Через некоторое время провод полностью очищается от вазелина (рис. 1-133, *г*).

Поясняют, что в процессе очистки существенную роль играет ускорение диффузии и растворения под действием ультразвука, а также кавитационные взрывы, возникающие у поверхности провода. С помощью ультразвука быстро могут быть очищены тела самой сложной формы.

Получение эмульсий. На дно широкой кюветы опускают излучатель с плоско-вогнутой линзой, как показано на рисунке 1-131, *г*, а затем наливают столько воды, чтобы поверхность ее совпала с фокальной плоскостью линзы. В кювету добавляют несколько капель трансформаторного масла. При настройке генератора на собственную частоту пьезопластинки на поверхности воды, покрытой тонким слоем масла, образуется фонтан, который разбивает масло на мелкие частицы. Через 3—5 мин облучения в кювете образуется однородная эмульсия.

Биологическое действие. В кювету с водой, в которой плавают рачки-циклопы, опускают на 2—3 мин излучатель ультразвука. Большие местные давления, возникающие в воде вследствие кавитации, губительно действуют на циклопов. Под действием ультразвука циклопы прекращают интенсивное движение и погибают.

С другими практическими применениями ультразвука учащихся знакомят, демонстрируя третий фрагмент — «Применение ультразвука в народном хозяйстве» — из учебного кинофильма «Ультразвук и его применение в технике». В этом фрагменте рассматривается применение ультразвука для обработки твердых сплавов, гидролокации, ультразвуковой дефектоскопии и др.

§ 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ОПЫТ 54. ОТКРЫТЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Оборудование: 1) генератор УВЧ, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) лампа неоновая, 4) лампа люминесцентная, 5) провода соединительные с наконечниками.

На расстоянии 10—15 см от контурного витка генератора устанавливают трубчатую петлю с раздвижными стержнями от приемного диполя. Включают генератор и постепенно выдвигают стержни, поднося каждый раз к концам петли баллончик неоновой лампочки. Когда длина петли достигнет 50 см, лампочка загорается (рис. 1-134). Наиболее яркое свечение лампочки наблюдается между концами стержней.

Можно вместо неоновой лампочки поднести к концам стержней люминесцентную лампу. Когда она засветится, повернуть ее и расположить вдоль петли. Тогда можно заметить, что свече-

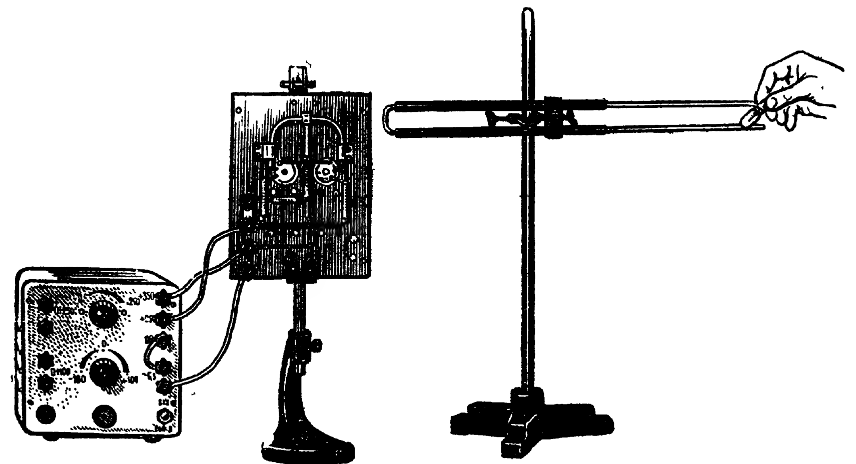


Рис. 1-134. Установка для демонстрации действия петлевого колебательного контура.

5 Зак. 1357

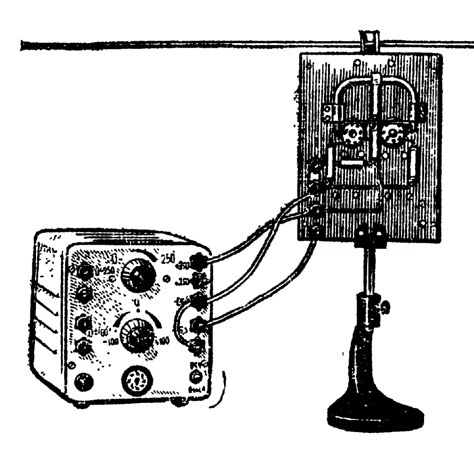


Рис. 1-135. Генератор УВЧ с диполем.

ние лампы, наиболее яркое у концов стержней, к изгибу петли постепенно убывает.

Проведенный опыт показывает, что проволочная петля представляет собой колебательный контур, собственная частота которого зависит от ее длины. В отличие от колебательных контуров с сосредоточенными емкостью и индуктивностью, применявшихся в предыдущих опытах, в данном контуре и емкость и индуктивность распределены вдоль всей петли.

Существенной особенностью этого контура является то, что при изменении расстояния между ветвями контура собственная частота его не изменяется: при сближении ветвей емкость их увеличивается, а индуктивность соответственно уменьшается. Это можно доказать на опыте.

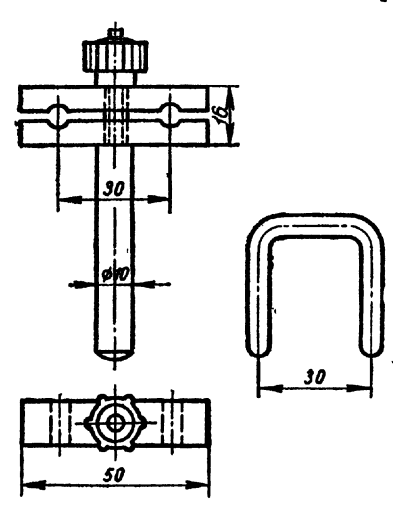


Рис. 1-136. Скоба и зажим для развертывания петлевого контура.

Трубчатые стержни петлевого контура, тщательно настроенного в резонанс с генератором, снимают со скобы и насаживают на винты выдвинутой планки генератора (рис. 1-135). Полученный таким способом прямой стержень длиной 100 см не только не потерял свойств колебательного контура, но и сохранил свою прежнюю собственную частоту. Чтобы убедиться в этом, подносят к концам полученного открытого колебательного контура (диполя) неоновую или люминесцентную лампу. Она так же ярко вспыхивает, как и в первом опыте.

Электрические колебания в открытом колебательном контуре представляют собой стоячую волну тока и напряжения. Амплитуда колебания электрических зарядов, распределенных по всей длине диполя, имеет посередине наибольшую величину, а к концам диполя постепенно убывает до нуля. Таким образом, в середине диполя образуется пучность тока, а на концах — узлы. Колебания напряжения имеют наибольшую амплитуду на концах. Следовательно, на концах диполя образуются пучности напряжения, а на середине — узел.

Для развертывания петлевого контура в диполь необходимо к набору деталей, прилагаемых к генератору УВЧ, добавить соединительную скобу и зажим (рис. 1-136). Проволоку для скобы надо подобрать по внутреннему диаметру (около 5 мм) трубки раздвижных стержней приемного диполя, а зажим для установки собранного петлевого контура в штативе надо изготовить из двух изолирующих колодок и стержня с гайкой.

ОПЫТ 55. ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Передачу и прием электромагнитных волн можно продемонстрировать двумя способами. В первом опыте, описанном ниже, применяют ламповый генератор УВЧ, а в качестве приемника — диполь с миниатюрной лампой накаливания. Во втором опыте используют искровой передатчик и диполь с когерером, применявшиеся на заре радиотехники и описанные в учебнике «Физика-10».

1. Оборудование: 1) генератор УВЧ, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) приемный диполь с лампой накаливания миниатюрной МН 1 В; 0,068 А, 7) провода соединительные с наконечниками.

На демонстрационном столе устанавливают генератор УВЧ с навинченными на его передвижную планку трубками, образующими диполь длиной 100 см. Приемный диполь с лампочкой устанавливают на подставке на расстоянии 2—3 м от генератора так, чтобы оба диполя были параллельны. Включив генератор, настраивают приемный диполь. Для этого изменяют его длину с помощью выдвинутых стержней. Более точную настройку производят регулированием величины связи излучающего диполя с контуром генератора. Для этого освобождают вертикальную планку с излучающим диполем и, передвигая ее в вертикальном направлении, закрепляют в таком положении, при котором лампа в приемном диполе светится наиболее ярко.

Расположение приемного диполя параллельно излучающему является наивыгоднейшим. Чтобы убедиться в этом, поворачивают приемный диполь в вертикальное положение, затем устанавливают его вдоль направления распространения электромаг-

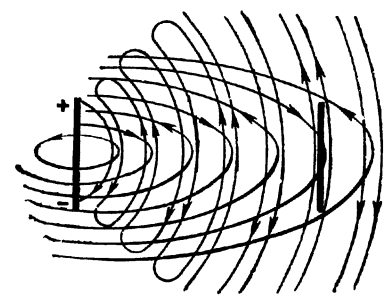


Рис. 1-137. Схема электромагнитного поля прямого вибратора.

нитных волн. И в том и другом положении диполя лампа не горит. Лампа горит ярче всего, когда диполь расположен вдоль силовых линий электрического поля. При обходе вокруг генератора с диполем в руках диполь приходится поворачивать. Эти опыты приводят к выводу, что излучение происходит наиболее интенсивно в плоскости, проходящей через середину излучающего диполя и перпендикулярной к нему. Кроме того, они помогают понять структуру электромагнитного поля, изображенную на рисунке 1-137.

Чтобы определить длину электромагнитной волны, надо воспользоваться явлением отражения и интерференции волн. Для этого помещают металлический стержень длиной 110 см позади генератора (рис. 1-138) и обращают внимание учащихся на то, что это сильно влияет на яркость горения лампы приемного диполя. Оказывается, что лампа горит наиболее ярко, когда расстояние между стержнем и излучающим диполем равно 0,5 м. В этом случае электромагнитные волны, проходя через стержень, возбуждают в нем электрические колебания и он сам становится излучателем (его называют пассивным вибратором). Две системы волн, идущие к приемному диполю от излучающего и отражающего диполей, налагаются и усиливают друг друга, так как разность их хода равна длине волны (с учетом потери полуволны при отражении). Таким образом, расстояние, равное 0,5 м, является четвертью длины волны; следовательно, длина волны, излучаемой генератором УВЧ, равна 2 м. Сочетание излучающего и отражающего диполей представляет собой

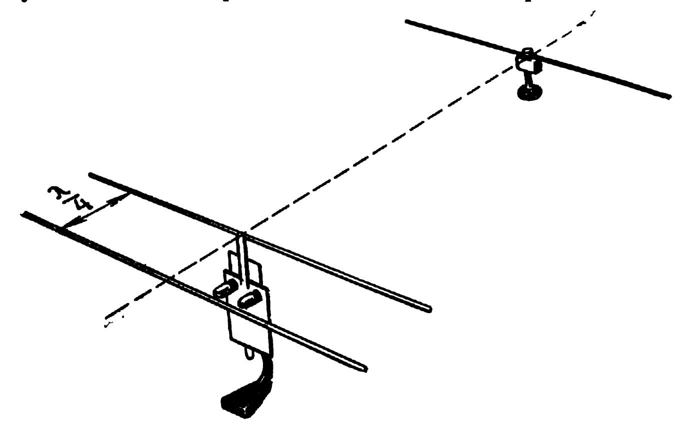


Рис. 1-138. Направленное излучение.

простейшую антенну направленного действия. Если такими отражателями снабдить одновременно и передающий и приемный диполи, то дальность передачи можно увеличить до 8—10 м.

При проведении опытов необходимо учитывать сильное действие на работу установки различных металлических стержней, балок, водопроводных и газовых труб, находящихся в помещении, где проводят опыты, и расположенных параллельно диполям. В зависимости от своего положения в результате интерференции они или ослабляют накал лампы или усиливают его.

2. Оборудование: 1) преобразователь высоковольтный «Разряд-1» или машина электрофорная, 2) выпрямитель селеновый ВС-4-12, 3) вольтметр демонстрационный, 4) диполь-излучатель, 5) диполь с когерером, 6) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или соответствующая батарея гальванических элементов, 7) провода соединительные с наконечниками.

На рисунке 1-139 изображен передатчик, состоящий из высоковольтного преобразователя и диполя длиной около 1 м с искровым промежутком 10—15 мм. При включении преобразователя в промежутке между стержнями диполя возникает прерывистый электрический разряд, представляющий собой ряд быстро следующих друг за другом искр. В паузах между отдельными искровыми разрядами обе половины диполя заряжаются от преобразователя и разность потенциалов между ними возрастает, пока не наступит пробой воздушного промежутка. Теперь обе половины диполя соединены проводящей плазмой, и в нем в течение всего времени разряда совершаются затухающие колебания. После того как разряд погаснет, весь процесс повторится.

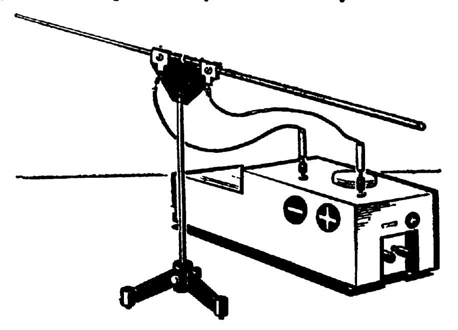


Рис. 1-139. Диполь с искровым промежутком, соединенный с высоковольтным преобразователем.

Для приема электромагнитных волн, излучаемых диполем, на другом конце стола устанавливают второй такой же диполь (рис. 1-140), обе половины которого соединены когерером.

К зажимам когерера последовательно присоединяют источник постоянного тока на 3,5 В и демонстрационный гальванометр от вольт-

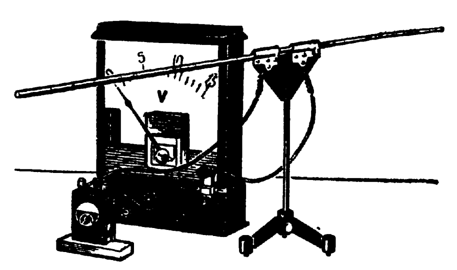


Рис. 1-140. Диполь с когерером, соединенный с гальванометром и источником тока.



Рис. 1-141. Когерер.

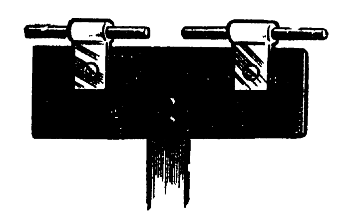


Рис. 1-142. Держатель для стержней излучающего диполя.

метра со шкалой 3,5 В и демонстрационный гальванометр от вольтметра со шкалой на 15 делений и добавочным резистором напряжением 5 В (здесь шкала не соответствует добавочному резистору, так как в этом опыте вольтметр используется не в качестве измерителя, а в качестве индикатора тока).

Сопротивление металлических опилок когерера в обычном состоянии настолько велико, что гальванометр почти не обнаруживает тока. Однако достаточно в излучающем диполе возбудить искру, как стрелка гальванометра отклоняется и тем самым регистрирует прием сигнала.

Ток через когерер не прекращается и при выключении передатчика; надо легкими ударами встряхнуть когерер, чтобы стрелка гальванометра возвратилась к нулю.

Действие когерера подробно описано в учебнике «Физика-10» и учащимся известно. Для изготовления когерера надо подобрать два коротких латунных стерженька (рис. 1-141) такого диаметра, чтобы их можно было достаточно свободно вкладывать в трубки диполя и в короткую стеклянную трубочку такого же внутреннего диаметра. Концы стерженьков, спиленные наискось, должны образовать внутри трубки промежуток 2—3 мм, который заполняют железными или никелевыми опилками. Необходимо иметь в виду, что опилки надо готовить в день проведения опыта, так как уже на другой день когерер может не сработать из-за образования тончайшего слоя окисла на опилках.

Диполями в этом опыте могут служить четыре стержня из комплекта генератора УВЧ и держатель от приемного диполя, в котором вместо вилки с диодом надо вставить когерер. Для излучающего диполя с искровым промежутком надо изготовить специальный держатель, изображенный на рисунке 1-142.

Спирали, которыми провода присоединены к зажимам диполей (см. рис. 1-139 и 1-140), являются высокочастотными дроссельными катушками, они должны иметь 10—15 витков диаметром 15—20 мм.

ОПЫТ 56. МОДУЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Для демонстрации амплитудной модуляции предлагаются два описанных ниже опыта. Первый из них является как бы продолжением опыта 23 по получению незатухающих колебаний в ламповом генераторе и в основном соответствует описанию, приведенному в учебнике «Физика-10». Второй опыт дает представле-

ние только о сущности процесса, и установка для его проведения значительно проще.

1. Оборудование: 1) осциллограф электронный ОЭШ, 2) генератор звуковой школьный, 3) выпрямитель универсальный ВУП, 4) панель ламповая демонстрационная с триодом, 5) трансформатор универсальный, 6) катушка дроссельная, 7) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 8) трансформатор на панели, 9) провода соединительные с наконечниками, 10) ящик-подставка.

Незатухающие электрические колебания, которые предстоит модулировать колебаниями более низкой частоты, получают в ламповом генераторе на установке, изображенной на рисунке 1-143. Схему этой установки учащиеся должны иметь в тетрадях, для чего ее следует заранее начертить на доске.

Так же, как и в опыте 23, колебательный контур генератора включен не в анодную цепь, а в цепь сетки. Это освобождает колебательный контур от постоянной составляющей анодного тока и тем самым значительно облегчает объяснение действия генератора.

Для получения достаточно большой частоты колебательный контур составлен из катушки «220» универсального трансформатора и конденсатора емкостью 1 мкФ. Катушка контура расположена поверх дроссельной катушки, надетой на незамкнутый сердечник. Последняя служит катушкой обратной связи и включена в анодную цепь. Это устройство позволяет получить незатухающие колебания частотой около 600 Гц.

Переменное напряжение указанной частоты с колебательного контура подается на вертикальный вход осциллографа, который следует отрегулировать так, чтобы поместить на горизонталь-

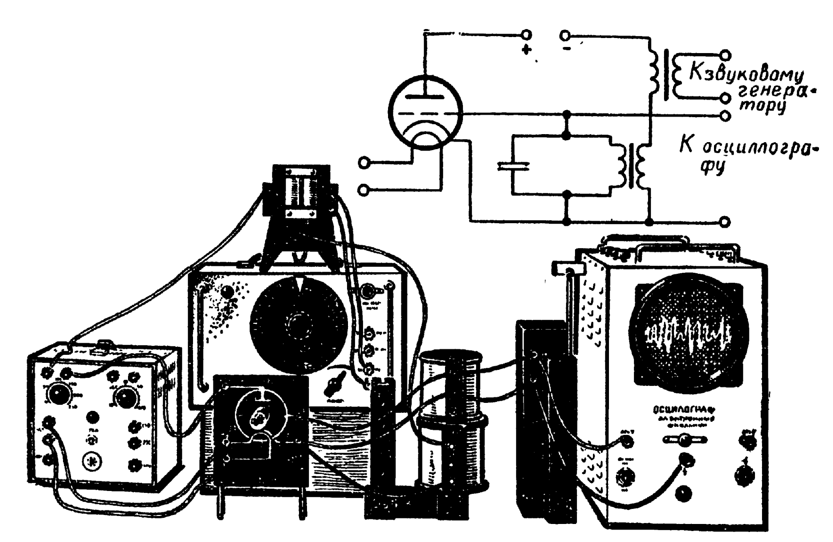


Рис. 1-143. Установка для демонстрации модулированных колебаний.

ной оси около 30 периодов и получить неподвижную осциллограмму.

Последовательно с катушкой обратной связи включают катушку «120» трансформатора на панели. Вторая его катушка «4» питается переменным током частотою около 60 Гц с низкоомных зажимов звукового генератора. Таким образом, частота модулирующих колебаний примерно в десять раз меньше несущей частоты.

Пока звуковой генератор не включен, на экране осциллографа наблюдаются колебания с постоянной амплитудой. Поворачивая ручку регулятора напряжения на выпрямителе, изменяют в небольших пределах анодное напряжение. От этого импульсы анодного тока в катушке обратной связи усиливаются и ослабевают, по-разному воздействуя на катушку колебательного контура. Это обнаруживается по соответствующему изменению амплитуды колебаний на экране осциллографа.

Далее включают звуковой генератор. Теперь в анодной цепи появился как бы второй источник анодного напряжения, который периодически то усиливает, то ослабляет импульсы анодного тока, вследствие чего амплитуда колебаний в колебательном контуре, имеющих частоту 600 Гц, изменяется с частотой около 60 Гц, что и обнаруживается на экране осциллографа.

При хорошо отрегулированной осциллограмме колебаний несущей частоты включение модулятора требует дополнительной регулировки путем небольшого изменения частоты колебаний звукового генератора.

2. Оборудование: 1) осциллограф электронный ОЭШ, 2) генератор звуковой школьный, 3) микрофон угольный, 4) камертон на резонаторном ящике, 5) молоточек резиновый, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) кинофильм «Физические основы радиопередачи», 8) кинопроектор.

Сущность процесса амплитудной модуляции можно показать на простой установке, изображенной на рисунке 1-144. Для этого присоединяют микрофон к зажимам низкоомного (5 Ом) выхода звукового генератора, настроенного на частоту около 18 кГц, и к зажимам микрофона присоединяют электронный осциллограф.

Установив диапазон развертки в осциллографе 30—130 Гц, включают звуковой генератор и демонстрируют осциллограмму синусоидальных колебаний. После этого постепенно уменьшают частоту развертки, пока осциллограмма на экране не превратится почти в сплошную полосу.

Взяв камертон с резонатором двумя пальцами левой руки за шейку, подносят резонатор отверстием к микрофону и ударяют камертон резиновым молоточком. Ручкой плавной настройки подбирают наивыгоднейшую частоту развертки и получают устойчивую осциллограмму модулированных колебаний (рис. 1-145).

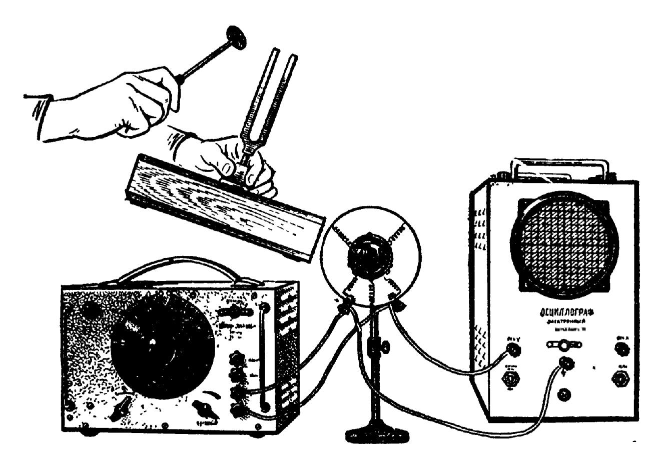


Рис. 1-144. Получение осциллограммы модулированных колебаний.

Наблюдаемое явление нетрудно объяснить. Пока микрофон бездействует, напряжение на его зажимах, подаваемое на вход осциллографа от звукового генератора, изменяется с постоянной амплитудой и ширина полосы на экране не меняется. Звучание камертона приводит в движение мембрану микрофона. При изменении давления мембраны на угольные зерна их сопротивление начинает изменяться. В такт с изменением сопротивления меняется сила тока в микрофоне, а следовательно, и напряжение на его зажимах. Амплитуда колебаний несущей частоты периодически возрастает и убывает с частотой колебаний камертона.

Следует иметь в виду, что в описанной установке заменять угольный микрофон электродинамическим нельзя. При такой замене вместо воздействия колебаний низкой частоты на амплитуду колебаний высокой частоты получится простое сложение двух колебаний, ничего общего не имеющее с амплитудной модуляцией.

Описанные выше опыты следует заключить демонстрацией третьего кинофрагмента — «Амплитудная модуляция» — и четвертого кинофрагмента — «Экскурсия в радиоцентр» — учебного кинофильма «Физические основы радиопередачи»[1].

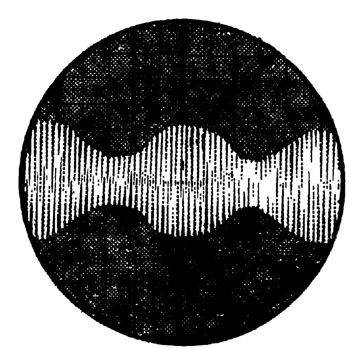


Рис. 1-145. Осциллограмма модулированных колебаний.

[1] Физические основы радиопередачи. Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1968, 2 ч. (4 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 20 мин.

ОПЫТ 57. ПРИЕМ РАДИОВЕЩАНИЯ НА ДЕТЕКТОРНЫЙ ПРИЕМНИК

Оборудование: 1) радиоприемник детекторный демонстрационный, 2) усилитель низкой частоты, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) выпрямитель универсальный ВУП, 5) осциллограф электронный ОЭШ, 6) провода соединительные с наконечниками.

Для демонстрации действия детекторного радиоприемника собирают установку, изображенную на рисунке 1-146. К верхнему зажиму радиоприемника присоединяют наружную антенну, если предполагается прием дальней станции, или комнатную антенну для приема мощной близко расположенной радиостанции. К нижнему зажиму присоединяют заземление.

Включив выпрямитель в сеть, настраивают колебательный контур приемника. Для этого поворачивают ручку конденсатора, пока не станет слышна работа радиостанции.

Для перехода на другой диапазон катушку вынимают из гнезд, поворачивают и включают другой парой штырьков.

Выбрав из работающих радиостанций наиболее мощную, тщательно настраивают радиоприемник и присоединяют к зажимам «Антенна» и «Земля» входные зажимы электронного осциллографа, предварительно отрегулированного в диапазоне частот горизонтальной развертки 30—130 Гц с ослаблением 1 : 1 и большим усилением.

Во время передачи на экране получается осциллограмма модулированных колебаний (рис. 1-146, *а*). В паузах осциллограмма выравнивается в сплошную ленту. При повороте ручки конденсатора меняется ширина ленты, т. е. амплитуда колебаний высокой частоты.

Если верхний провод от осциллографа перенести на правую сторону детектора, то осциллограмма меняет свой характер. Происходит детектирование, и на экране видна осциллограмма звуковых колебаний (рис. 1-146, *б*).

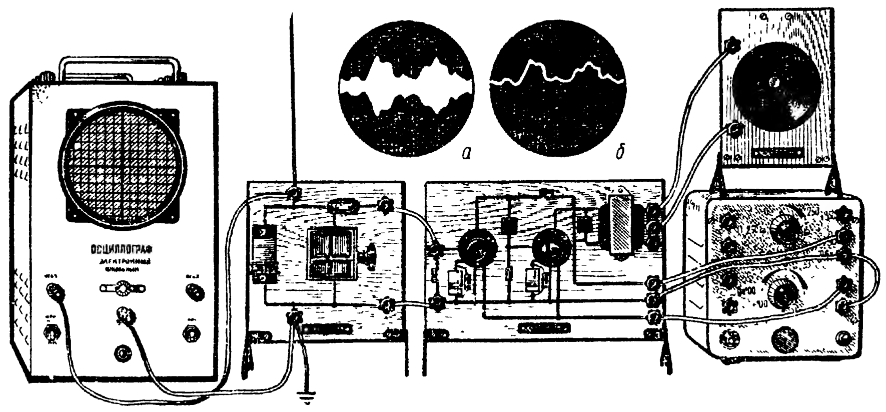


Рис. 1-146. Детекторный радиоприемник с усилителем низкой частоты и осциллографом.

ОПЫТ 58. РАДИОУПРАВЛЕНИЕ

Ниже описаны два опыта, которые демонстрируют принцип управления по радио различными механизмами. Первый опыт прост в постановке и по своему содержанию вполне достаточен для выяснения принципа радиоуправления. Второй опыт показывает более широкие возможности радиоуправления.

1. Оборудование: 1) генератор УВЧ, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) диполь приемный с диодом, 4) радиореле поляризованное, 5) аппарат телеграфный демонстрационный, 6) гальванометр демонстрационный от амперметра, 7) ключ телеграфный, 8) батарея аккумуляторная 3-НКН-10, 9) провода соединительные с наконечниками.

Электрическая лампа, включенная в середину приемного диполя,— слишком грубый индикатор для приема радиосигналов. Более чувствительным индикатором является электромагнитное реле, которое можно использовать для приведения в действие различных устройств. Однако оно не может действовать непосредственно от тока высокой частоты, возникающего в приемном диполе. Необходимо ток высокой частоты преобразовать в постоянный ток.

Для демонстрации такого преобразования лампу в приемном диполе заменяют полупроводниковым диодом, вмонтированным в штепсельную вилку, и присоединяют зажимы диполя к гальванометру от демонстрационного амперметра (рис. 1-147).

В генераторе УВЧ размыкают зажимы, соединенные перемычкой, и присоединяют к ним телеграфный ключ.

Разместив приемную и передающую установку на несколько большем расстоянии, чем в опыте 55, нажимают на ключ передатчика. Стрелка гальванометра отклоняется в ту или другую сторону в зависимости от способа включения вилки с диодом.

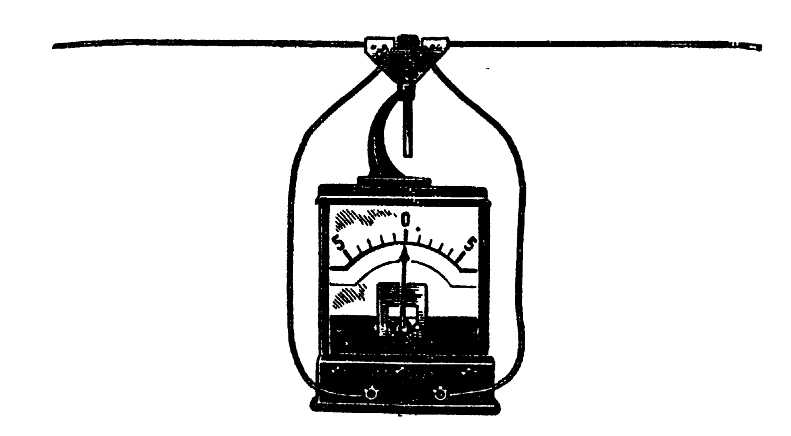


Рис. 1-147. Прием радиосигналов на гальванометр.

Затем вилку переворачивают и показывают, что стрелка отклоняется в противоположную сторону.

Очевидно, что ток в диполе, возбуждаемый электромагнитными волнами, пропускается диодом только в одном направлении. При этом в одной половине диполя накапливается положительный заряд, а в другой — отрицательный. Разряжается диполь через обмотку гальванометра, через которую, таким образом, течет постоянный ток.

Заменив приемный диполь радиореле, соединяют выходные зажимы поляризованного реле с источником постоянного тока на 3,5 В и моделью телеграфного аппарата (рис. 1-148). Нажимая на ключ, демонстрируют передачу и прием телеграфных сигналов. При желании телеграфный аппарат может быть заменен электрическим звонком, электродвигателем, зуммером и другими объектами управления.

2. Оборудование: 1) генератор УВЧ, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) ключ телеграфный, 4) комплект приборов по радиотелемеханике, 5) провода соединительные с наконечниками.

Объектом радиоуправления служит небольшая модель грузового автомобиля или тележки, приводимая в движение микродвигателем, который действует от батареи 3336Л (для карманного фонаря). Второй такой же микродвигатель служит для поворота передних колес. Для управления моделью по радио в кузове справа устанавливают панель шагового реле, а слева — панель усилителя из набора по радиотелемеханике со штырем, высокочастотным диодом и поляризованным реле (рис. 1-149). Обе панели насаживаются на штырьки имеющимися на них гнездами, чем обеспечиваются все необходимые электрические соединения.

Поворачивая пальцем храповик шагового реле, заставляют модель поочередно выполнять запрограммированные в ней команды: «Вперед», «Направо», «Стоп», «Назад», «Налево»,

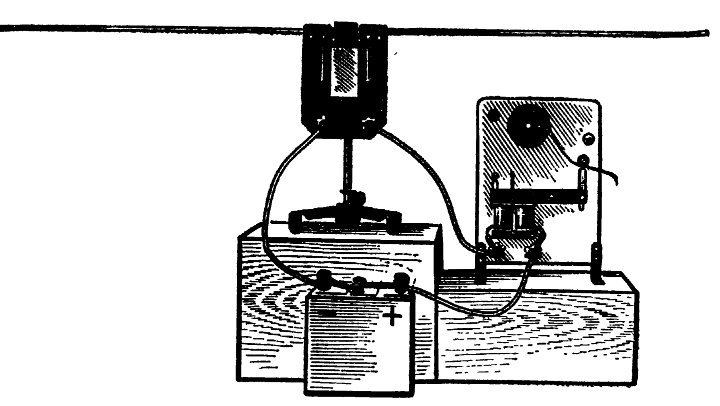


Рис. 1-148. Установка для приема телеграфных сигналов.



Рис. 1-149. Модель автомобиля, управляемая по радио.

«Стоп». Команде «Стоп» соответствуют горизонтальное и вертикальное положения щеток шагового реле.

После проверки действия механизмов щетки устанавливают в положение «Стоп» и ставят модель в некотором отдалении от передатчика.

Управляющие сигналы подаются от генератора УВЧ, закрепленного в штативе так, что его диполь располагается вертикально (рис. 1-150). Перемычку в цепи сетки надо снять, а к освободившимся зажимам присоединить телеграфный ключ (или специальный пульт управления).

Включив генератор и выждав, пока прогреются лампы, нажимают и отпускают ключ. При посылке радиосигнала храповик шагового реле поворачивается на один зуб и модель выполняет очередную команду (если реле не действует, надо перевернуть вилку с диодом).

Учащимся можно показать заранее начерченную схему приемного и управляющего устройств (рис. 1-151) и разъяснить их действие.

Батарея в кузове модели служит для питания двух параллельных цепей. В одной цепи включена обмотка электромагнита шагового реле и корпус модели. Когда контакты *3* и *4* разомкнуты, то ток в этой цепи отсутствует. Ток течет по другой замкнутой цепи: от батареи через контакт *10*, нижнюю щетку, контакт *9*, обмотку двигателя поворота, контакт *11*, верхнюю щетку, кон-

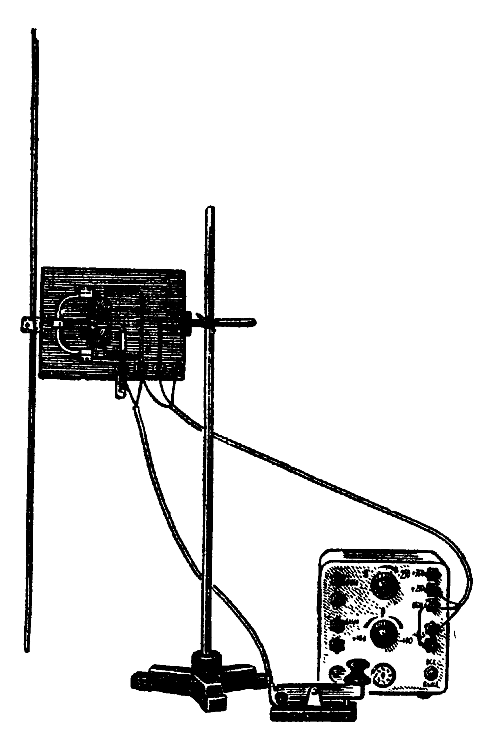


Рис. 1-150. Генератор УВЧ с телеграфным ключом.

такт *7*, замкнутые контакты *2* и *3*, корпус и батарею. Как видно, в рассмотренный момент автомобиль поворачивает передние колеса.

При посылке сигнала в открытом колебательном контуре (штырь — диод — корпус) возникает переменное напряжение высокой частоты, но диод имеет одностороннюю проводимость и ток через него течет только вверх. Вследствие этого основание триода заряжается отрицательно относительно эмиттера, в цепи коллектора появляется ток и контакты *3—4* замыкают цепь обмотки электромагнита шагового реле. Щетки шагового реле при этом переходят в новое положение, и после прекращения сигнала, когда контакты *2—3* вновь замкнутся, автомобиль начинает двигаться, выполняя очередную команду.

При благоприятных условиях, когда не происходит ослабления сигнала вследствие поглощения и интерференции, дальность действия установки достигает 10—15 м.

Модель автомобиля можно заменить моделью подъемного крана, закрепленной на классной доске. В ней так же установлены два микродвигателя, из которых один перемещает каретку в горизонтальном направлении, а второй — поднимает или опускает блок с грузом. В этом случае радиореле и шаговое реле устанавливают на демонстрационном столе, а провода от электродвигателей крана присоединяют к соответствующим гнездам шагового реле.

59. КИНОФИЛЬМ «РАДИОЛОКАЦИЯ»

Оборудование: 1) кинофильм «Радиолокация»[1], 2) кинопроектор.

Фильм состоит из трех фрагментов. В первом из них — «Определение дальности» — объясняется принцип передачи сигнала от-

[1] Радиолокация. Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1962, 1 ч. (3 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 10 мин.

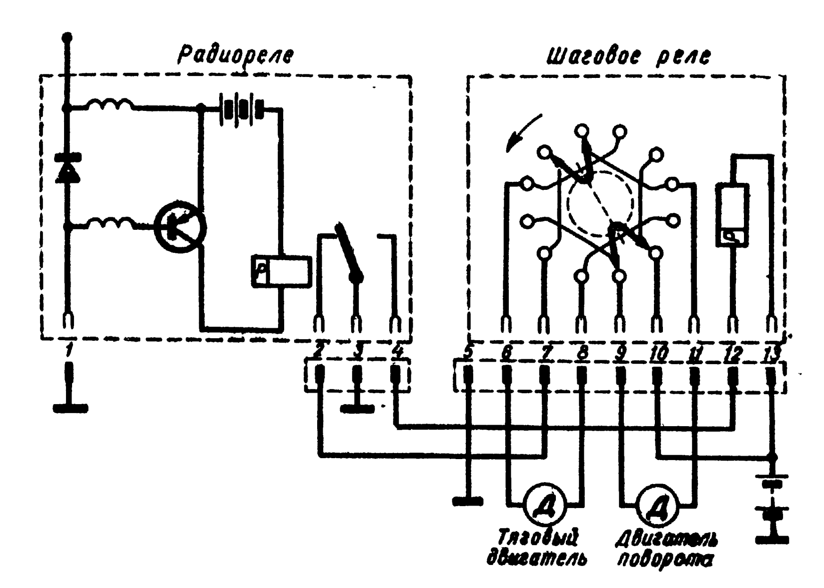


Рис. 1-151. Схема приемного и управляющего устройств.

дельными импульсами. Показан способ определения расстояния до объекта с помощью электроннолучевой трубки.

Во втором фрагменте — «Определение угловых координат» — рассказывается, как определяется направление на объект по принимаемому сигналу и положению антенны. Вводятся угловые координаты: азимут и угол места.

В третьем фрагменте — «Блок-схема радиолокационной станции» — показана работа радиолокационной станции в целом. Названы основные узлы радиолокационной станции и их назначение: генератор высокочастотных импульсов, переключатель, антенна, приемник, индикатор, синхронизатор. Демонстрируется поочередное включение антенны на прием и передачу сигнала.

В конце фильма приводятся различные примеры применения радиолокации: вождение самолетов и судов в тумане, панорамный локатор для обзора местности, радиолокация Луны и Венеры, управление полетом ракеты и др.

ОПЫТ 60. ОСНОВНЫЕ ДЕМОНСТРАЦИИ С ГЕНЕРАТОРОМ САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Оборудование: 1) комплект приборов для изучения свойств электромагнитных волн, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) усилитель низкой частоты, 4) громкоговоритель электродинамический, 5) провода соединительные с наконечниками.

При уменьшении длины электромагнитных волн у них все отчетливее проявляются свойства, характерные для света.

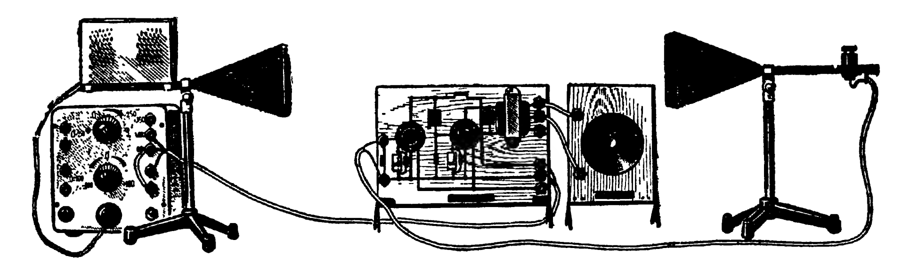


Рис. 1-152. Установка для демонстрации свойств электромагнитных волн.

Чтобы показать это, надо на ряде опытов продемонстрировать явления пропускания и поглощения, отражения и преломления, интерференции и поляризации электромагнитных волн. Для этой цели служит комплект приборов, состоящий из генератора сантиметровых волн ($\lambda=3$ см), приемника и ряда вспомогательных принадлежностей [1].

Перед демонстрацией опытов проводят следующую подготовку (рис. 1-152).

На концах демонстрационного стола устанавливают на одинаковой высоте генератор и приемник рупорными антеннами друг к другу.

Вставляют штепсельный разъем экранированного шнура в панельку универсального выпрямителя ВУП.

Устанавливают позади приемника усилитель низкой частоты с присоединенным к его верхним зажимам динамиком и подключают наконечники шнура приемника к двум левым зажимам усилителя (центральную жилу присоединяют к верхнему зажиму, а оплетку экрана — к нижнему).

Три нижних зажима усилителя присоединяют к тому же блоку, который служит для питания генератора, в таком порядке: зажим «+250» ВУП — к верхнему зажиму УНЧ, зажим «—общ.» ВУП — к среднему зажиму УНЧ, верхний зажим «~6,3» ВУП — к нижнему зажиму УНЧ. Нижний зажим «~6,3» закорачивают с зажимом «—общ.» ВУП.

Для ознакомления учащихся с собранной установкой сообщают, что источником электромагнитных волн длиной 3 см служит генератор, который благодаря рупорной антенне дает остронаправленное излучение. Колебания, вырабатываемые генератором, модулированы звуковой частотой. Приемник также имеет направленное действие. В его волноводе установлен кремниевый диод, который служит детектором. Выделенные детектором электрические колебания звуковой частоты усиливаются и преобразуются динамиком в звук.

---

[1] См. брошюру: Шахмаев Н. М. Комплект приборов для изучения свойств электромагнитных волн (ПЭВ-1). М., 1975.

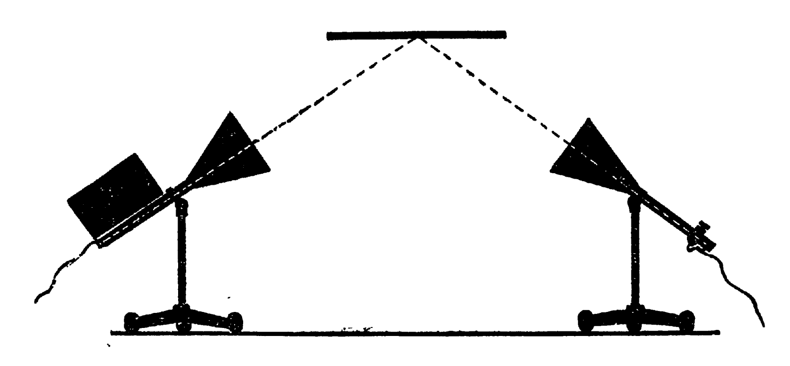


Рис. 1-153. Отражение электромагнитных волн.

Пропускание и поглощение электромагнитных волн. Через некоторое время после включения блока питания в сеть динамик начинает звучать. Поворачивая сначала рупор генератора, а затем рупор приемника, показывают острую направленность излучения и приема. Затем приводят генератор и приемник в первоначальное положение и помещают между приемником и генератором металлический экран. При этом наблюдают ослабление и прекращение приема.

Повторяют опыт с экранами из изолирующих материалов и убеждаются, что они не производят столь сильного экранирующего действия.

Отражение. Генератор и приемник поворачивают, как показано на рисунке 1-153, после чего прием прекращается. Берут алюминиевую пластину и находят для нее такое положение, при котором восстанавливается громкий прием. Поворачивая пластину, показывают, что наиболее громкий прием наблюдается, когда угол падения электромагнитного луча равен углу отражения и когда падающий и отраженный лучи находятся в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности, восставленным из точки падения.

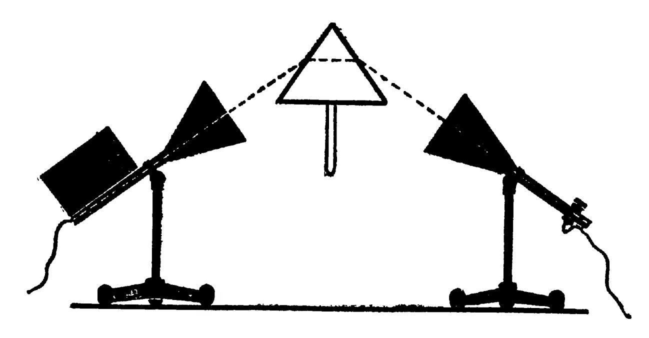


Рис. 1-154. Преломление электромагнитных волн.

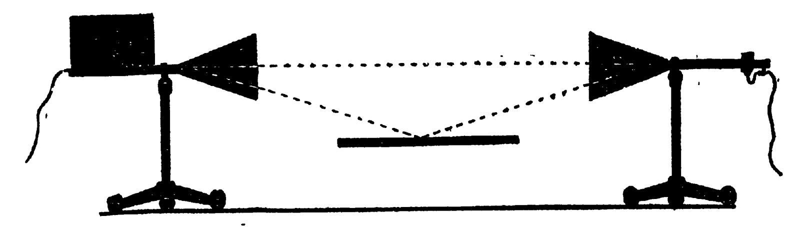


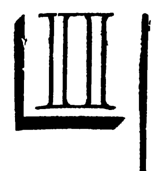
Рис. 1-155. Интерференция электромагнитных волн.

Преломление. Воспользовавшись предыдущей установкой генератора и приемника, берут в руку треугольную призму из диэлектрика и помещают ее на место отражающей пластины (рис. 1-154). При этом наблюдают восстановление приема. Опыт позволяет определить ход луча и сделать вывод о его преломлении на гранях призмы.

Интерференция. Генератор и приемник размещают друг против друга (рис. 1-155). Затем подводят снизу металлическую пластину в горизонтальном положении. Постепенно поднимая пластину, обнаруживают поочередное ослабление и усиление приема. Пользуясь чертежом на доске, разъясняют наблюдаемое явление.

Поперечность электромагнитных волн. Получив громкий прием в предыдущей установке, поворачивают генератор вокруг продольной оси его волновода и наблюдают прекращение приема при повороте на 90°. То же наблюдается при поворачивании приемника.

Между генератором и приемником устанавливают поляризационную решетку. Поворачивая решетку в ее оправе, наблюдают ослабление приема, когда прутья решетки располагаются вдоль вектора напряженности электрического поля. Эти опыты свидетельствуют о том, что электромагнитные волны поперечны.



ОПТИКА

§ 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Для демонстрации опытов по оптике, кроме основных приборов (см. введение), требуется прежде всего правильный подбор источников света, приемников света и индикаторов тока. Они должны быть хорошо согласованы между собой и с необходимой вспомогательной аппаратурой, имеющейся в школьных физических кабинетах.

Источниками света могут служить электрические лампы: автомобильные, осветительные (газополные) и проекционные. Автомобильные лампы ближе других подходят к так называемым «точечным» источникам света.

О силе света осветительных ламп можно судить по обозначенной на них мощности.

Проекционную лампу мощностью 300 Вт применяют в качестве сравнительно мощного источника света. У этой лампы спираль накала образует небольшую площадку с минимальным расстоянием между отдельными секциями, что делает ее удобной для некоторых опытов.

Приемниками света могут быть: термостолбик, полупроводниковый фотоэлемент и глаз.

Важнейшим свойством любого приемника является его чувствительность к различным частотам падающего излучения. Лучшим приемником в этом смысле является термостолбик. Однако он имеет тепловую инерцию — сравнительно долго нагревается. Поэтому для демонстрационных опытов удобнее применять полупроводниковые фотоэлементы (селеновый, сернистосеребряный), реагирующие на свет практически мгновенно. У них, как и у термостолбика, зависимость между током и световым потоком линейная при условии не слишком большой освещенности и не слишком большом сопротивлении внешней цепи. Следует иметь в виду, что чувствительность фотоэлементов зависит не только от интенсивности падающего на них излучения, но и от его спектрального состава.

Индикаторами тока могут быть чувствительный демонстрационный гальванометр М1032, а в случае применения сернисто-серебряного фотоэлемента — демонстрационный гальванометр, имеющий чувствительность $5 \cdot 10^{-5}$ А/дел [1].

Визуальные фотометрические наблюдения и измерения выполняются с помощью простейших фотометров и люксметров. Они носят относительный характер и дают погрешность 10—20%. Роль глаза в этих измерениях сводится к установлению равенства освещенности двух поверхностей.

Чтобы повысить точность измерений и выразительность таких демонстрационных опытов, необходимо стремиться к созданию наилучших условий для работы глаза: при сравнении пользоваться источниками света с близкими спектральными характеристиками, поддерживать высокий уровень освещения и адаптировать глаз на темноту.

Для некоторых опытов необходимо оставить учащихся на несколько минут в затемненном помещении, во время демонстрации не допускать излишнего освещения и не нарушать достигнутого состояния адаптации глаза. Восстановление адаптаций требует длительного времени, что может излишне затянуть опыт.

При демонстрации опытов с оптическими приборами дополнительно применяют учебные «Таблицы по физике для X класса». На этих таблицах основное внимание уделяется выяснению хода пучков света в оптических приборах.

ОПЫТ 61. ПОЛУЧЕНИЕ ТЕНИ И ПОЛУТЕНИ

Оборудование: 1) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 2) патрон комбинированный с автомобильной лампой А6-21, 3) лампа электрическая с матовым стеклом, 4) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт. (или трансформатор универсальный), 5) выключатели однополюсные демонстрационные — 2 шт., 6) провода соединительные с наконечниками, 7) экран настольный, 8) штатив универсальный, 9) диск картонный диаметром примерно 80 мм на проволочной ножке с подставкой.

Для демонстрации опыта собирают установку по рисунку 2-1. На стойке универсального штатива укрепляют на некотором расстоянии друг от друга осветитель для теневого проецирования и комбинированный патрон с автомобильной лампой на напряжение 6 В. Обе лампы подключают параллельно к батарее аккумуляторов или трансформатору напряжением 6—8 В. В каждую цепь вводят выключатель. На расстоянии 1—1,5 м от лампы на столе располагают экран, а перед ним — картонный диск на проволочной ножке с подставкой. Затемняют класс и приступают к демонстрации опытов.

Вначале зажигают лампу осветителя для теневого проецирования, направляют свет лампы на экран и проецируют на него тень от картонного диска.

---

[1] Гальванометры прежних выпусков могут применяться только с усилителем постоянного тока.

Рис. 2-1. Демонстрация тени от диска при помощи точечного источника.

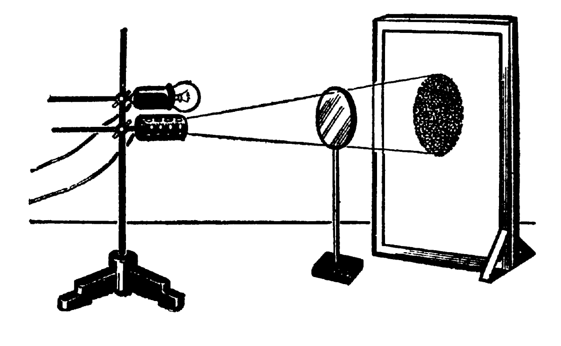


Рис. 2-2. Демонстрация тени и полутени от диска при помощи двух точечных источников света.

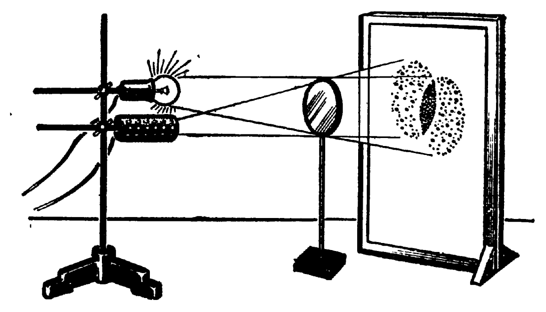
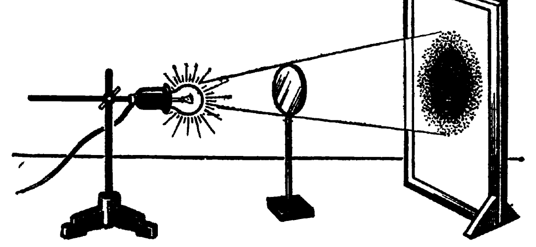


Рис. 2-3. Демонстрация тени и полутени от диска при помощи электрической лампы накаливания с матовым стеклом.



Учащимся показывают, что при точечном источнике, вследствие прямолинейного распространения света, форма тени повторяет форму диска (если плоскость диска параллельна экрану); размер тени тем больше, чем ближе диск к источнику света; тень имеет резкие границы, как бы далеко ни отстоял экран от диска.

После этого зажигают вторую лампу. На экране получают тень и две полутени (рис. 2-2). Далее включают поочередно то одну, то другую лампу, а затем обе сразу. В результате убеждаются, что тень на экране образуется в том месте, куда не падает свет ни от одной лампы, а полутень — то место, куда падает свет лишь от одной лампы. Очевидно, на освещенную часть экрана падает свет от обеих ламп.

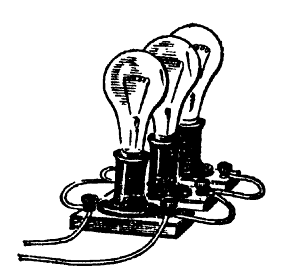
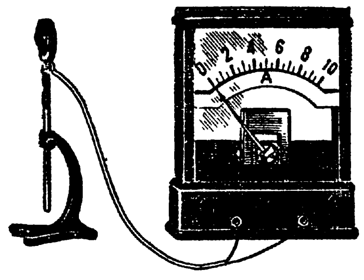



Рис. 2-4. Демонстрация зависимости освещенности от силы света источника.

Сближая обе лампы, показывают, что область полной тени увеличивается, а область полутеней уменьшается. Затем удаляют лампы друг от друга и наблюдают, что область полной тени уменьшается, а область полутеней увеличивается.

После этого изменяют постепенно положение диска и снова наблюдают за изменением областей тени и полутеней. При приближении диска к лампам размер тени уменьшается, а полутеней увеличивается. Начиная с некоторого расстояния, тень исчезает совсем и на экране остаются только две круглые полутени, размеры которых увеличиваются по мере приближения диска к лампам.

Наконец, демонстрируют опыт с одной лампой, баллон которой сделан из матового или молочного стекла. Лампу ввертывают в комбинированный патрон и включают в осветительную сеть. При таком источнике света на экране наблюдают тень от диска, окруженную полутенью (рис. 2-3). Учащихся просят объяснить наблюдаемое явление.

ОПЫТ 62. ЗАВИСИМОСТЬ ОСВЕЩЕННОСТИ ОТ СИЛЫ СВЕТА ИСТОЧНИКА

Оборудование: 1) фотоэлемент селеновый[1] на подставке, 2) гальванометр демонстрационный от амперметра, 3) лампы электрические мощностью 60—100 Вт на подставках — 3 шт., 4) провода соединительные с наконечниками.

На демонстрационном столе устанавливают рядом друг с другом три одинаковые электрические лампы мощностью 60—100 Вт. Лампы соединяют параллельно и включают в сеть переменного тока.

На расстоянии примерно 1,5 м от ламп располагают селеновый фотоэлемент, укрепленный на подставке и соединенный с демонстрационным гальванометром, обладающим чувствительностью $5 \cdot 10^{-5}$ А/дел (рис. 2-4).

[1] Он входит в комплект полупроводниковых приборов (можно применить и фотоэлемент ФЭСС-У10).

Перед опытом проверяют установку: в затемненном классе зажигают каждую лампу отдельно и замечают показания прибора. Если токи окажутся неодинаковыми, то их уравнивают путем незначительного изменения положения ламп относительно фотоэлемента.

Демонстрацию опыта начинают с показа одинакового отклонения стрелки гальванометра при освещении фотоэлемента каждой отдельной лампой. После этого включают сразу две, а затем три лампы и убеждаются, что освещенность фотоэлемента, о величине которой судят по величине тока, пропорциональна числу включенных ламп, т. е. силе света источника.

В этом опыте селеновый фотоэлемент можно заменить сернистосеребряным или школьным термостолбиком с раструбом и полностью раздвинутыми шторками. Тогда в качестве индикатора берут чувствительный демонстрационный гальванометр или демонстрационный гальванометр с усилителем постоянного тока.

ОПЫТ 63. ЗАВИСИМОСТЬ ОСВЕЩЕННОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА СВЕТА

Оборудование: 1) аппарат проекционный с автомобильной лампой А6-21, 2) фотоэлемент селеновый, 3) гальванометр демонстрационный от амперметра, 4) метр демонстрационный, 5) штатив универсальный, 6) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт., 7) провода соединительные с наконечниками.

На конце оптической скамьи проекционного аппарата, раздвинутой до предела, устанавливают корпус осветителя с автомобильной лампой А6-21 (без рефлектора), а перед ним — селеновый фотоэлемент. При этом обращают внимание на то, чтобы центр фотоэлемента находился на одном уровне с нитью лампы.

Позади скамьи, возможно ближе к ней, в лапке штатива укрепляют демонстрационный метр, как показано на рисунке 2-5. При установке метра следует раскрыть корпус осветителя и проследить за тем, чтобы нить лампы была расположена напротив нулевого деления метра (без ошибок на параллакс).

Лампу соединяют с батарей аккумуляторов, а фотоэлемент — с демонстрационным гальванометром, обладающим чувствительностью $5 \cdot 10^{-5}$ А/дел.

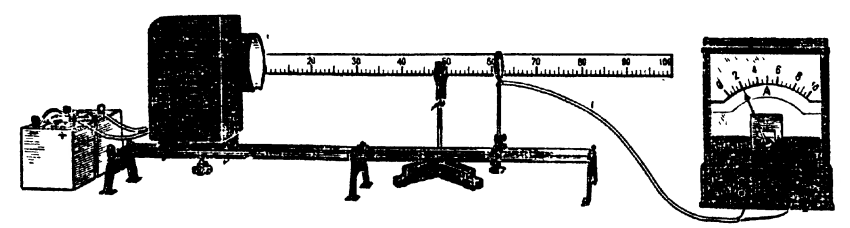


Рис. 2-5. Демонстрация зависимости освещенности от расстояния до источника света.

Фотоэлемент в начале опыта располагают от горящей лампы на небольшом расстоянии, но так, чтобы гальванометр не был перегружен, а его стрелка установилась на каком-либо целом делении шкалы. Затем, пользуясь шкалой метра, расстояние увеличивают в два или три раза. Тогда ток в цепи уменьшается соответственно в четыре или девять раз, т. е. учащиеся практически убеждаются в известной закономерности: освещенность поверхности, создаваемая точечным источником света, обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника.

В этом опыте вместо автомобильной лампы можно взять лампу проекционную. Однако для получения с ней сравнительно хороших результатов фотоэлемент следует располагать за пределами оптической скамьи на расстоянии не меньше 1,5 м. В противном случае будут наблюдаться большие погрешности, так как при меньшем расстоянии взятый источник света нельзя считать близким к точечному.

В случае применения проекционной лампы приемником света может быть школьный термостолбик с раструбом и полностью раздвинутыми шторками, а индикатором тока — демонстрационный гальванометр с усилителем постоянного тока.

ОПЫТ 64. ЗАВИСИМОСТЬ ОСВЕЩЕННОСТИ ОТ УГЛА ПАДЕНИЯ ПУЧКА СВЕТА

Оборудование: 1) фотоэлемент селеновый, 2) гальванометр демонстрационный от амперметра, 3) диск оптический, 4) прибор лабораторный для изучения законов фотометрии, 5) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт., 6) провода соединительные с наконечниками, 7) штатив универсальный.

Для демонстрации опыта собирают установку по рисунку 2-6. Вначале из осветителя оптического диска вынимают коробку со щелевыми диафрагмами и плоскими зеркалами; лампу подключают к батарее аккумуляторов и, передвигая ее вдоль корпуса осветителя, добиваются получения параллельного пучка света. Затем регулируют положение осветителя относительно оптиче-

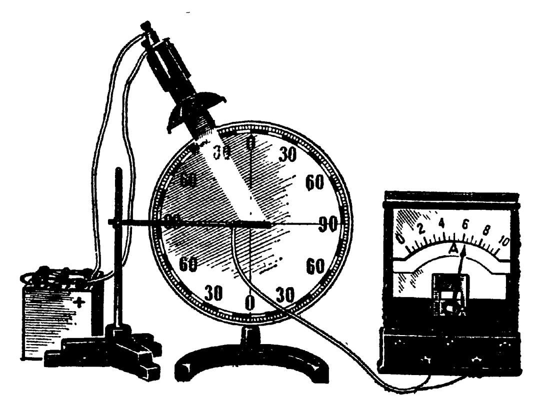


Рис. 2-6. Демонстрация зависимости освещенности от угла падения пучка света.

ского диска так, чтобы на поверхности диска получилась одинаковой ширины светлая полоска, проходящая через центр при любом положении осветителя. После этого около центра диска устанавливают горизонтально селеновый фотоэлемент, соединенный с демонстрационным гальванометром. Затемняют класс и приступают к демонстрации опыта.

Вначале записывают величину тока, соответствующую наибольшей освещенности фотоэлемента. После этого, медленно вращая осветитель вокруг горизонтальной оси, изменяют несколько раз угол падения пучка света на поверхность фотоэлемента (α) и записывают показания гальванометра (величину тока I) в таблицу.

Угол падения пучка света α (в градусах)	Величина тока I (число делений шкалы)	$I_0 \cos\alpha$
0	15	15
15	14,4	14,5
30	12,8	13,0
45	10,5	10,6
60	7,6	7,5

Для выяснения закономерности начальную величину тока I_0 (угол $\alpha=0^0$) последовательно умножают на косинусы углов падения пучка света и результаты записывают в таблицу. Обращают внимание учащихся, что полученные числа совпадают (в пределах погрешности измерений) с величинами токов, отмеченных гальванометром для этих углов.

Очевидно, в этом опыте можно воспользоваться оптическим диском прежней конструкции. В этом случае фотоэлемент следует укрепить на расстоянии 5—6 см от поверхности шайбы, чтобы он при освещении не затемнялся ширмой.

Крепление фотоэлемента удобно выполнить с помощью самодельной металлической пластинки Г-образной формы, один конец которой зажимают под клемму фотоэлемента, а другой — под винт диска (рис. 2-7). Из ширмы вынимают одну среднюю вставку.

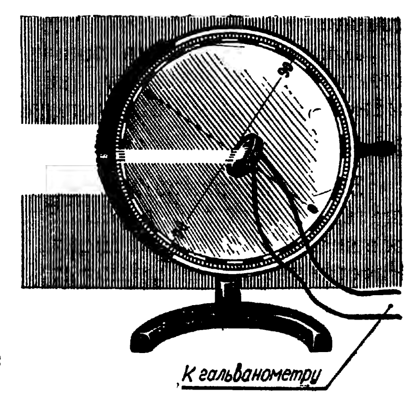


Рис. 2-7. Оптический диск с фотоэлементом.

Подготовленный таким образом прибор вносят в параллельный пучок света, полученный от проекционного аппарата с одной линзой конденсора. В качестве источника света берут лампу А6-21.

Затем, поднимая или опуская

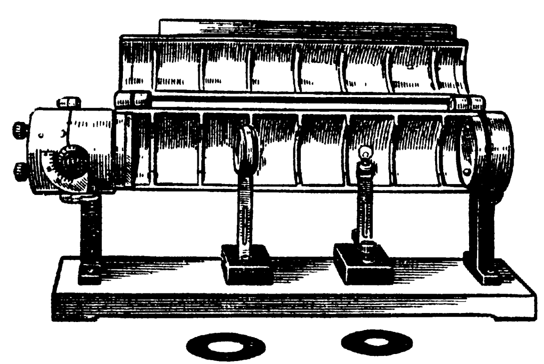


Рис. 2-8. Прибор лабораторный для изучения законов фотометрии.

диск на подставке и поворачивая прибор вокруг вертикальной оси, добиваются полной и равномерной освещенности фотоэлемента и четкого следа светового пучка на диске.

Демонстрация опыта протекает, как описано выше, но теперь для изменения угла падения пучка света вращают не осветитель, а диск с фотоэлементом.

Для подготовки к практикуму учащихся кратко знакомят с устройством лабораторного прибора по фотометрии и порядком выполнения работы «Определение зависимости фототока от освещенности и построение графика». Прибор представляет собой открывающуюся пластмассовую трубу, укрепленную горизонтально на подставке (рис. 2-8).

В левой съемной части трубы находится селеновый фотоэлемент, зажимы которого с помощью гибких проводов соединены с внешними зажимами прибора. Чтобы показать фотоэлемент, трубу раскрывают.

Учащимся сообщают, что при выполнении работы фотоэлемент соединяют с микроамперметром, а внутрь трубы помещают электрическую лампу на напряжение 3,5 В, укрепленную на подставке.

Для установления зависимости тока фотоэлемента от освещенности фотоэлемент закрывают поочередно тремя диафрагмами с круглыми отверстиями, площади которых относятся, как $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}$.

Затем показывают, что электрическая лампа может перемещаться вдоль оси трубы. Это позволяет проверить зависимость освещенности фотоэлемента от расстояния до источника света. Расстояние отсчитывают по шкале, укрепленной под трубой.

Далее показывают, что фотоэлемент можно поворачивать в трубе вокруг оси, проходящей по диаметру активной поверхности фотоэлемента. Это позволяет изучить зависимость освещенности фотоэлемента от угла падения пучка света. Угол наклона плоскости фотоэлемента к оси трубы отсчитывают по угломеру, укрепленному на поверхности трубы. Для получения параллельного

пучка света, необходимого в этом опыте, в трубу вводят собирающую линзу на подставке. Линза и лампа входят в комплект прибора.

Все опыты с прибором по фотометрии не нуждаются в затемнении и проводятся при полном освещении лаборатории, так как пластмассовая труба надежно защищает фотоэлемент от света посторонних источников.

ОПЫТ 65. СРАВНЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА ДВУХ ИСТОЧНИКОВ

Оборудование: 1) фотометр школьный, 2) фотоэлемент селеновый на подставке, 3) гальванометр демонстрационный от амперметра, 4) лампы электрические мощностью 60—100 Вт на подставке — 3 шт., 5) метры демонстрационные — 2 шт., 6) провода соединительные с наконечниками.

Этот опыт можно продемонстрировать с помощью школьного фотометра. Однако более эффектно он может быть поставлен с самодельным демонстрационным фотометром.

Прибор для опыта изготовляют из куска картона размером 300×500 мм. Картон с одной стороны окрашивают черной тушью, затем складывают пополам. К окрашенной стороне приклеивают круг, вырезанный из белой бумаги. Диаметр круга, равный примерно 160 мм, должен совпадать с линией изгиба.

Для опытов изготовленный фотометр развертывают в двугранный угол 120°, обе половины закрепляют перемычкой и ставят на стол за двумя демонстрационными метрами, сложенными своими концами (рис. 2-9). По сторонам от фотометра ставят два известных источника света, например с одной стороны лампу 75 Вт, а с другой — две такие же лампы.

Учащимся кратко поясняют, что во всех фотометрах имеются два сравниваемых световых поля, каждое из которых освещается только одним источником света. Такими полями в рассматриваемом фотометре являются два белых бумажных полукруга, которые приклеены к черной поверхности картона. Поля располагаются всегда рядом друг с другом и не разделяются заметной границей. При работе с фотометром роль глаза сводится к установлению равенства освещенностей полей.

После этого в затемненном классе показывают способы применения фотометра. Не поворачивая прибора, медленно переме-

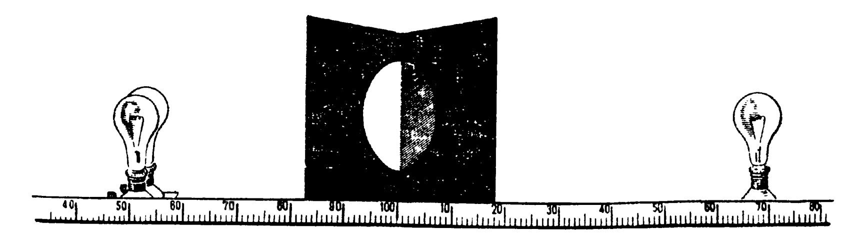


Рис. 2-9. Установка для сравнения силы света двух источников.

щают один из источников света и добиваются равенства освещенности полей фотометра. Затем по демонстрационным метрам замечают расстояния от границы световых полей до источников. Зная силы света источников (I_1 и I_2) и расстояния их до фотометра (R_1 и R_2), устанавливают из опыта известное соотношение:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}.$$

Опыт повторяют с двумя электрическими лампами разной мощности и определяют силу света одного источника, приняв другой за эталон.

Далее учащихся знакомят с другим способом установки фотометра. Для этого поля фотометра развертывают под углом 90° и, чтобы величина угла оставалась постоянной, закрепляют перемычкой. Фотометр устанавливают на одинаковом расстоянии от тех же источников света и медленно поворачивают вокруг вертикальной оси, проходящей через границу световых полей (рис. 2-10). Выясняют, что при одинаковой освещенности фотометра силы света источников обратно пропорциональны косинусам углов падения пучков света:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1},$$

где α_1 и α_2 — углы падения пучков света.

Так как $\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} = \frac{AO}{OB}$, то измерение углов α_1 и α_2 можно заменить измерением отрезков AO и OB демонстрационным метром, расположенным вдоль прямой, соединяющей источники.

При работе с фотометром свет, идущий от ламп в аудиторию, необходимо закрыть от учащихся непрозрачными экранами. Наблюдение за фотометром во время опыта лучше вести одним глазом, так как в этом случае исчезает пространственное расположение полей и они как бы сближаются. Это повышает точность измерений.

Вместо описанного фотометра можно использовать фотоэлемент, соединенный с демонстрационным гальванометром. В качестве датчика света обычно применяется селеновый фотоэлемент, так как его спектральная чувствительность близка к спектральной чувствительности нашего глаза.

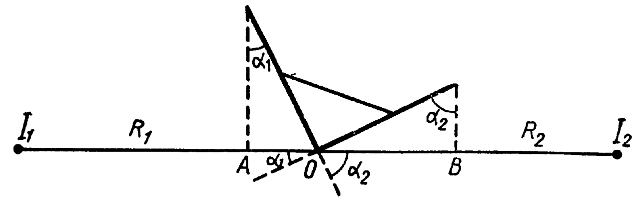


Рис. 2-10. Схема установки фотометра и источников света (вид сверху).

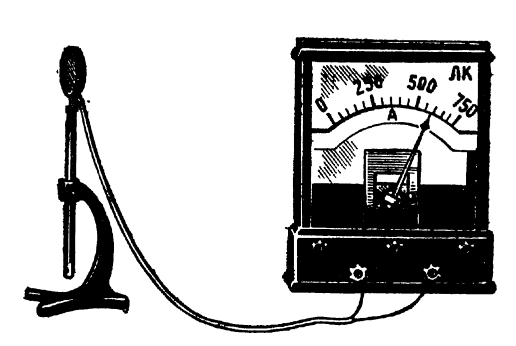


Рис. 2-11. Демонстрационный люксметр.

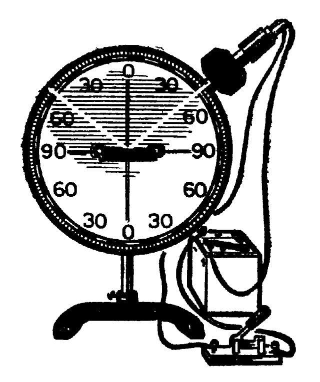


Рис. 2-12. Демонстрация зеркального отражения света.

Если шкалу гальванометра предварительно проградуировать в единицах освещенности, то получится измерительный прибор — люксметр (рис. 2-11).

ОПЫТ 66. ЗЕРКАЛЬНОЕ И ДИФФУЗНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Оборудование: 1) диск оптический с плоским зеркалом, 2) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт. (или трансформатор универсальный), 3) выключатель однополюсный демонстрационный, 4) провода соединительные с наконечниками, 5) две полоски бумаги (черная и белая) размером 90×20 мм.

В центре оптического диска укрепляют плоское зеркало, расположив его по диаметру с делениями 90° (рис. 2-12). Лампу осветителя подключают через выключатель к батарее аккумуляторов или трансформатору напряжением 6—8 В. Затемняют класс и включают осветитель.

На поверхности диска наблюдают четкие следы падающего и отраженного от зеркала пучков света. Обращают внимание учащихся на то, что отраженный пучок имеет такую же ширину и почти такую же яркость, как и падающий. Изменяя направление падающего пучка, показывают, что соответственно изменяется и направление отраженного.

Закрывают зеркало черной бумагой — отраженный пучок исчезает. Заменяют черную бумагу белой. Падающий пучок от белой бумаги отражается по всем направлениям, и потому диск над бумагой становится заметно светлее. Такое отражение света называют рассеянным или диффузным отражением.

Зеркальное и диффузное отражение света можно демонстрировать и без оптического диска. Для этого в пучок света от осветителя для теневого проецирования или проекционного аппарата, расположенного вдоль демонстрационного стола, вносят плоское зеркало. Отраженный от зеркала пучок света направляют на по-

толок и стены класса, демонстрируя направленное отражение света.

Затем в пучок света вносят лист белой бумаги. Бумага отражает свет по всем направлениям. Поворачивая лист бумаги, освещают рассеянным светом потолок, учащихся и стены физического кабинета.

ОПЫТ 67. ОДНОВРЕМЕННОЕ ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

Оборудование: 1) диск оптический со стеклянным полуцилиндром, 2) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт. (или трансформатор универсальный), 3) выключатель однополюсный демонстрационный, 4) провода соединительные с наконечниками.

Стеклянный полуцилиндр укрепляют в центре оптического диска так, чтобы плоская грань стекла совпала с диаметром диска, имеющего на концах деления 90° (рис. 2-13). Лампу осветителя подключают через однополюсный демонстрационный выключатель к батарее аккумуляторов (или трансформатору) напряжением 6—8 В. Затемняют класс и приступают к демонстрации опыта.

Осветитель устанавливают в верхней половине диска под углом 30—40° к вертикальному диаметру диска, имеющего на концах деления 0—0°. Наблюдают, как пучок света на границе двух сред (воздух — стекло) раздваивается: часть его отражается от плоской поверхности стекла и проходит по диску вверх, другая часть проходит через стекло, отклоняясь от первоначального направления. Эти явления называют соответственно отражением и преломлением света.

Изменяя направление падающего пучка путем перемещения осветителя, демонстрируют изменение направлений отраженного и преломленного пучков света.

ОПЫТ 68. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Оборудование: 1) диск оптический с плоским зеркалом, 2) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт. (или трансформатор универсальный), 3) выключатель однополюсный демонстрационный, 4) провода соединительные с наконечниками, 5) лист белой плотной бумаги размером 160×200 мм.

Собирают установку по рисунку 2-12. В центре оптического диска укрепляют плоское зеркало так, чтобы его отражающая поверхность совпадала с диаметром диска, имеющего на концах деления 90—90°. Лампу осветителя подключают через однополюсный демонстрационный выключатель к батарее аккумуляторов (или трансформатора) напряжением 6—8 В. Предварительно проверяют равенство углов падения и отражения пучков света при различных положениях осветителя. После этого слегка затемняют класс и приступают к демонстрации опыта.

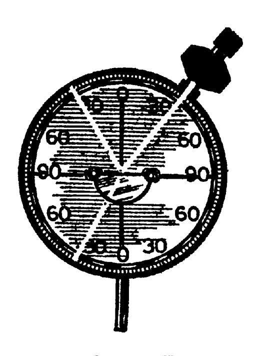


Рис. 2-13. Демонстрация одновременного отражения и преломления света на границе раздела двух сред.

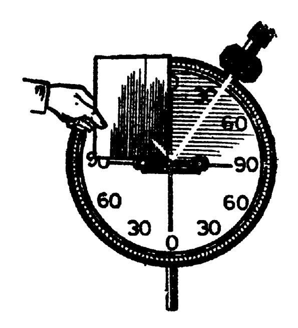


Рис. 2-14. Демонстрация законов отражения света.

Осветитель устанавливают в правой верхней части диска и наблюдают падающий и отраженный пучки света.

Для установления законов отражения света последовательно изменяют направление падающего пучка и через каждые 10—20° измеряют углы падения и отражения, отсчитывая их по угловым делениям диска от верхнего конца нулевого диаметра. Результаты измерений записывают на классной доске. Обращают внимание учащихся на равенство этих углов.

Затем показывают, что падающий и отраженный пучки света лежат в одной плоскости. Для этого листом плотной бумаги закрывают ту четверть диска, где проходит отраженный пучок. Если бумага плотно прижата к диску, то на ней виден весь отраженный пучок. Если же лист немного повернуть вокруг диаметра диска с делениями 0—0°, как показано на рисунке 2-14, то на бумаге будет видно только начало отраженного пучка.

В заключение осветитель переводят в левую сторону диска и опыт повторяют, демонстрируя свойство обратимости световых пучков.

ОПЫТ 69. ИЗОБРАЖЕНИЕ В ПЛОСКОМ ЗЕРКАЛЕ

Оборудование: 1) зеркало плоское размером 250×350 мм (от ванны для проекции волн), 2) стекло плоское размером 250×350 мм, 3) штатив универсальный, 4) свечи одинакового размера — 2 шт., 5) экран настольный, 6) метр демонстрационный, 7) спички.

Плоское зеркало укрепляют вертикально в лапке штатива и располагают под углом 20—30° к кромке демонстрационного стола. К зеркалу подносят правую руку с отведенным в сторону большим пальцем. Изменяют положение руки относительно зер-

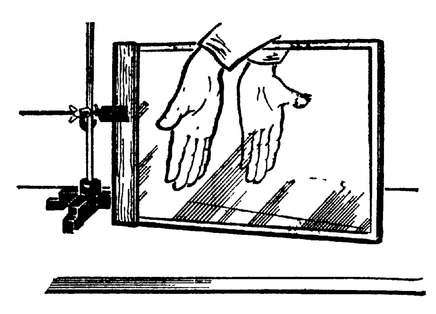


Рис. 2-15. Изображение правой руки в плоском зеркале.

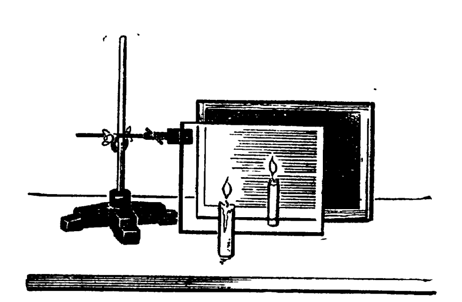


Рис. 2-16. Демонстрация изображения свечи в плоском зеркале.

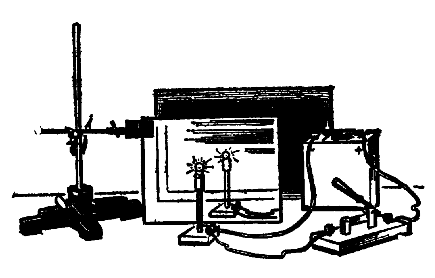


Рис. 2-17. Демонстрация изображения электрической лампы накаливания в плоском зеркале.

кала и наблюдают ее мнимое изображение (рис. 2-15). Правая рука в зеркале кажется левой.

Чтобы уточнить расположение мнимого изображения, в лапке штатива вместо зеркала укрепляют плоское стекло и располагают его вертикально. Позади стекла устанавливают черный экран. Перед стеклом и за ним (между стеклом и экраном) устанавливают одинаковые свечи. Положение свечей регулируют так, чтобы изображение передней, видимое в стекле, совпадало со свечой, расположенной за стеклом. В этом случае вторая свеча будет находиться точно в месте мнимого зеркального изображения первой.

Зажигают свечу, расположенную перед стеклом, при этом создается впечатление, что и вторая свеча зажжена (рис. 2-16).

После этого изменяют немного положение задней свечи. Иллюзия горения второй свечи исчезает, так как мнимое изображение горящей свечи, видимое в стекле, как в зеркале, теперь не совпадает со свечой, расположенной за стеклом.

Используя наблюдаемый эффект, находят положение мнимого изображения свечи за стеклом. Для этого совмещают снова заднюю свечу с изображением передней и при помощи демонстрационного метра измеряют расстояние каждой свечи до стекла. Убеждаются, что мнимое изображение находится за зеркалом на таком же расстоянии, на каком предмет расположен перед зеркалом.

В этом опыте вместо свечей можно взять две лампы накаливания МН 3,5 В; 0,28 А на подставках, включив одну из них в цепь батареи аккумуляторов (рис. 2-17).

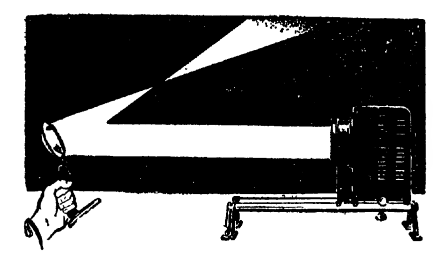


Рис. 2-18. Демонстрация отражения света от вогнутого сферического зеркала.

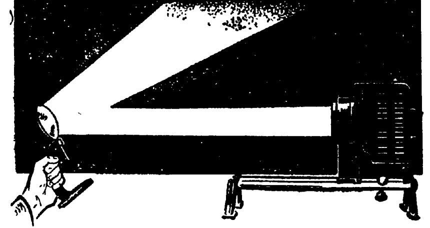


Рис. 2-19. Демонстрация отражения света от выпуклого сферического зеркала.

ОПЫТ 70. ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Оборудование: 1) зеркало вогнуто-выпуклое из набора линз и зеркал на подставке, 2) аппарат проекционный, 3) диск оптический с вогнутым и выпуклым сферическими зеркалами, 4) батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт. (или трансформатор универсальный), 5) выключатель однополюсный демонстрационный, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) дымарь

У проекционного аппарата убирают объектив и переднюю линзу конденсора. С помощью оставшейся линзы получают параллельный пучок света. Чтобы световой пучок был хорошо заметен всему классу, его направляют вдоль демонстрационного стола, а воздух перед проекционным аппаратом задымляют; при этом класс должен быть затемнен.

В параллельный пучок света вносят вогнутое сферическое зеркало. Наблюдают, как отраженный пучок, изменив свое направление, постепенно сужается, а затем расширяется (рис. 2-18). Затем в пучок света вносят выпуклое зеркало. Наблюдают, как свет от зеркала распространяется расходящимся пучком (рис. 2-19).

Дальнейшие опыты демонстрируют с оптическим диском. Осветитель диска подключают к батарее аккумуляторов (или трансформатору) напряжением 6—8 В и устанавливают в самое верхнее положение, чтобы центральный пучок света был направлен вдоль диаметра 0—0°. В щелевое устройство осветителя вставляют красно-зеленый светофильтр. В центре диска укрепляют вогнутое зеркало, показав его предварительно учащимся (рис. 2-20). С подготовленной установкой в затемненном классе демонстрируют следующие опыты:

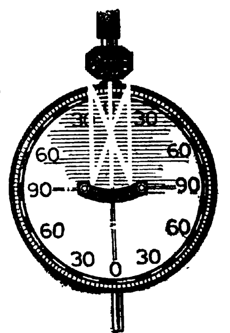


Рис. 2-20. Демонстрация отражения световых пучков от вогнутого сферического зеркала.

1. Открывают среднюю щель осветителя и получают на экране белую полоску, изображающую главную оптическую ось зеркала.

Боковые пучки направляют так, чтобы они проходили через геометрический центр зерка-

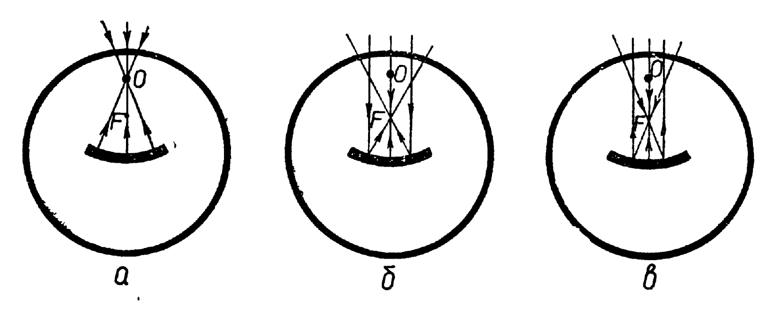


Рис. 2-21. Отражение световых пучков от вогнутого сферического зеркала.

ла. Обращают внимание на то, что пучки света, проходящие через геометрический центр зеркала, после отражения идут в обратном направлении (рис. 2-21, *а*).

2. На вогнутое зеркало направляют три пучка (красный, белый и зеленый), параллельные главной оптической оси. После отражения от зеркала пучки пересекаются в одной точке — главном фокусе зеркала (рис. 2-21, *б*). Эту точку надо отметить и показать, что главное фокусное расстояние зеркала равно половине его радиуса.

После этого боковые пучки света делают немного сходящимися, а затем расходящимися. В первом случае точка пересечения пучков оказывается ниже, а во втором — выше главного фокуса.

3. Боковые пучки направляют на зеркало так, чтобы они предварительно пересекли главную оптическую ось в точке, лежащей перед зеркалом. Если эта точка совпадает с главным фокусом зеркала, то отраженные пучки идут параллельно (рис. 2-21, *в*). В противном случае отраженные пучки получаются сходящимися, либо расходящимися.

4. Вогнутое зеркало заменяют выпуклым и демонстрируют аналогичную серию опытов, разделив их на три случая.

1) Центральный пучок света направляют вдоль главной оптической оси зеркала. Отраженный пучок идет в обратном направлении (рис. 2-22, *а*). Поворачивая осветитель вправо-влево, направляют падающий пучок так, чтобы отраженный совпал с падающим. Убеждаются, что продолжения падающих пучков за зеркало всякий раз проходят через одну и ту же точку — геометрический центр зеркала.

2) На выпуклое зеркало направляют три пучка (красный, белый и зеленый), параллельные главной оптической оси. Отраженные пучки расходятся в разные стороны (рис. 2-22, *б*). Если отраженные пучки продолжить за зеркало, то они пересекутся в мнимом фокусе зеркала, лежащем за зеркалом (на главной оптической оси) на середине радиуса.

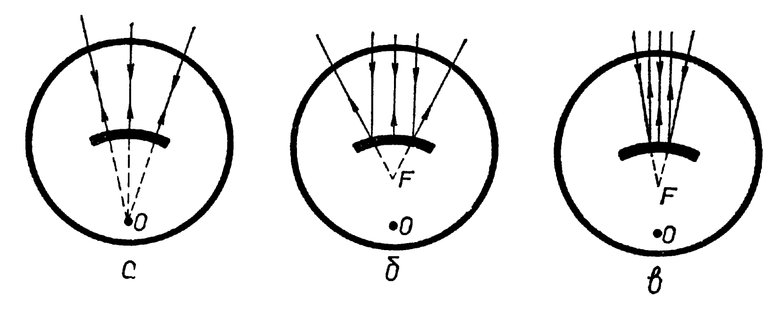


Рис. 2-22. Отражение световых пучков от выпуклого сферического зеркала

3) Боковые пучки света направляют на зеркало так, чтобы их продолжение за зеркало проходило через мнимый главный фокус. После отражения от зеркала пучки идут параллельно главной оптической оси (рис. 2-22, *в*).

ОПЫТ 71. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Оборудование: 1) зеркало вогнуто-выпуклое на подставке, 2) осветитель от проекционного аппарата, 3) экран настольный, 4) метр демонстрационный.

Проекционную лампу мощностью 300 Вт, помещенную в корпус осветителя, вогнутое зеркало на подставке и экран располагают на демонстрационном столе согласно рисунку 2-23 и демонстрируют следующие случаи изображения:

1. Лампу отодвигают от зеркала на возможно большее расстояние (на край демонстрационного стола), что соответствует удаленному предмету.

Приближая экран к зеркалу, получают действительное, обратное, уменьшенное изображение лампы. Чтобы учащиеся хорошо видели изображение, экран следует развернуть (примерно на 45°) в сторону класса.

С помощью демонстрационного метра измеряют расстояние от зеркала до изображения. Обнаруживают, что оно расположено примерно в главной фокальной плоскости зеркала.

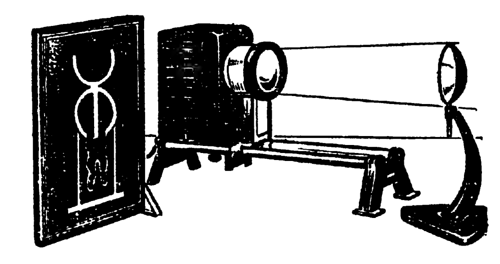


Рис. 2-23. Демонстрация изображения нити лампы накаливания при помощи вогнутого сферического зеркала.

2. Лампу устанавливают на двойном фокусном расстоянии от зеркала (в геометрическом центре

зеркала). Экран располагают сбоку лампы и наблюдают действительное, обратное изображение, равное по величине предмету и расположенное на таком же расстоянии, что и предмет.

Этот случай дает быстрый способ измерения радиуса (а значит, и фокусного расстояния) зеркала.

3. Лампу располагают между главным фокусом и центром зеркала. Отодвигая экран дальше от зеркала, получают четкое действительное, обратное и увеличенное изображение. Оно оказывается расположенным за двойным фокусным расстоянием от зеркала.

Показывают, чем ближе лампа расположена к главному фокусу, тем изображение больше и находится оно дальше от зеркала. При больших размерах изображения его проецируют на стену или проекционный экран.

4. Лампу устанавливают в главном фокусе зеркала. Перемещая экран, убеждаются в отсутствии действительного изображения, так как свет после отражения от зеркала распространяется параллельным пучком. Чтобы обнаружить параллельность светового пучка, надо расположить экран так, чтобы пучок «скользил» по экрану.

5. Наконец, лампу располагают перед зеркалом на расстоянии, меньшем фокусного расстояния. Получить действительное изображение в этом случае невозможно, так как после отражения от зеркала свет идет расходящимся пучком.

Чтобы увидеть изображение, зеркало поворачивают в сторону учащихся и просят их посмотреть на мнимое, прямое изображение лампы в зеркале. При этом напряжение на лампе уменьшают, чтобы не ослеплять глаза учащихся. Приближая зеркало к лампе, а затем отодвигая его, показывают, как в первом случае изображение уменьшается, а во втором — увеличивается.

6. Вогнутое зеркало заменяют выпуклым и на опыте убеждаются в том, что при любом положении лампы выпуклое зеркало дает изображение мнимое, прямое, уменьшенное и расположенное за зеркалом.

Каждый рассмотренный выше случай рекомендуется сопровождать построением соответствующего изображения на классной доске.

ОПЫТ 72. ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Оборудование: 1) диск оптический со стеклянным полуцилиндром, 2) аппарат проекционный.

Стеклянный полуцилиндр укрепляют в центре оптического диска так, чтобы плоская грань стекла совпала с диаметром диска, имеющего на концах деления 90° (рис. 2-24). На расстоянии 1—1,5 м от диска устанавливают универсальный проекционный аппарат с лампой мощностью 300 Вт. Перед конденсором аппарата располагают горизонтально раздвижную щель (ее укреп-

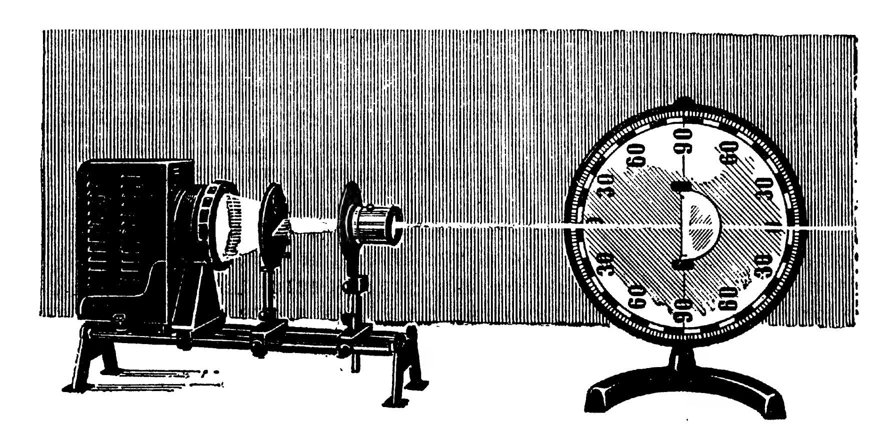


Рис. 2-24. Установка для демонстрации преломления света.

ляют в ширме дисковой диафрагмы). Узкий пучок света направляют вдоль нулевого диаметра диска на плоскую грань стеклянного полуцилиндра. Слегка передвигая диск вперед-назад и поворачивая вокруг вертикальной оси, добиваются четкого следа пучка на поверхности диска и внутри стекла. Для получения резких краев пучка объектив перемещают.

Демонстрируют преломление света при переходе из воздуха в стекло.

Сначала показывают, что пучок света, падающий перпендикулярно на плоскую грань стекла, проходит полуцилиндр без изменения своего направления (рис. 2-25, *а*). Затем диск поворачивают на некоторый угол вокруг горизонтальной оси и наблюдают в точке падения раздвоение падающего пучка: часть света отражается от стекла и идет в воздух под углом, равным углу падения, другая часть проходит из воздуха в стекло.

Обращают внимание учащихся на то, что преломленный пучок идет по радиусу внутри полуцилиндра, поэтому он выходит из стекла без изменения своего направления (рис. 2-25, *б*).

Изменяя угол падения, показывают, что соответственно изменяется и угол преломления, но последний остается всегда меньше угла падения. По мере приближения угла падения к 90° угол

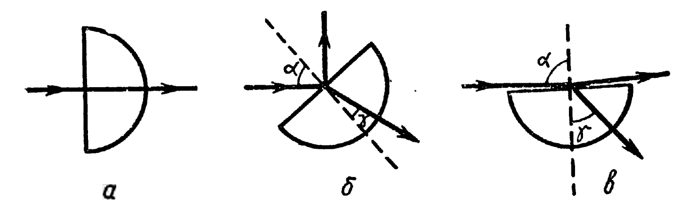


Рис. 2-25. Преломление и отражение светового пучка при переходе из воздуха в стекло.

преломления возрастает до максимального значения 42° (рис. 2-25, *в*).

При увеличении угла падения заметно возрастает яркость отраженного пучка, а преломленного соответственно уменьшается. При этом наблюдается также увеличение ширины преломленного пучка, в то время как у отраженного пучка она остается постоянной.

Для установления закона преломления через каждые 10—20° измеряют углы падения α и преломления γ, отсчитывая их по угловым делениям диска от концов нулевого диаметра. Результаты измерений записывают на классной доске в таблицу, в которую вносят дополнительно числовые значения синусов углов и их отношения.

Угол падения α (в градусах)	Угол преломления γ (в градусах)	$\sin\alpha$	$\sin\gamma$	$n_1=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$	$n_2=\frac{\sin\gamma}{\sin\alpha}$
10	7	0,174	0,122	1,42	0,70
20	13	0,342	0,225	1,52	0,69
30	19	0,500	0,326	1,53	0,65
40	25	0,643	0,423	1,52	0,66
50	30	0,766	0,500	1,53	0,66
60	35	0,866	0,574	1,51	0,67
		Среднее:		1,51	0,67

Демонстрацию преломления света при переходе из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную, начинают с пучка, идущего по нулевому диаметру диска. Поворачивают диск и направляют пучок света на выпуклую поверхность полуцилиндра (рис. 2-26, *а*). В этом случае пучок проходит полуцилиндр без преломления.

Затем направляют пучок под некоторым углом. Обращают внимание на то, что пучок при входе в стекло по известной уже причине не испытывает преломления, а при выходе из стекла отклоняется от первоначального направления, причем угол преломления стал больше угла падения (рис. 2-26, *б*).

Угол падения увеличивают до тех пор, пока угол преломления не приблизится к прямому, но так, чтобы еще не наступило полное отражение, рассмотрение которого в этом опыте преждевременно (рис. 2-26, *в*).

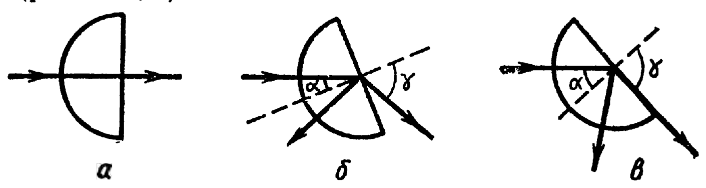


Рис. 2-26. Преломление и отражение светового пучка при переходе из стекла в воздух.

Одновременно с преломленным пучком наблюдают отраженный; он будет тем ярче, чем больше угол падения. Яркость преломленного пучка соответственно будет ослабевать.

Чтобы не производить новой записи результатов измерений, углы падения берут равными углам, записанным во втором столбце приведенной выше таблицы. Тогда углы преломления оказываются равными соответственно углам первого столбца таблицы. В прежней таблице добавляют еще один столбец, в который записывают значения показателя преломления воздуха относительно стекла.

На основании результатов обоих опытов формулируют законы преломления света, устанавливают свойство обратимости световых пучков при отражении и преломлении и взаимную связь между относительными показателями преломления стекла и воздуха, а именно: $n_1 = \frac{1}{n_2}$, или $n_1 \cdot n_2 = 1$.

В заключение полезно сделать оговорку, что законы отражения и преломления света справедливы только в том случае, если поверхность раздела двух сред по своим размерам значительно превосходит длину волны света. В противном случае начинают заметно сказываться волновые свойства света и установленные законы нарушаются. Кроме того, законы преломления справедливы для монохроматического света.

ОПЫТ 73. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Оборудование: 1) диск оптический со стеклянным полуцилиндром, 2) аппарат проекционный, 3) ванна стеклянная (или аквариум) размером 35×16×20 см, 4) экран для ванны, белый размером 34×25 см, 5) трубка U-образная стеклянная, 6) столик подъемный, 7) светофильтр красный, 8) шар металлический закопченный, 9) ящики-подставки — 2 шт., 10) вода или керосин.

Собирают установку по рисунку 2-24 и повторяют демонстрацию преломления света, идущего из среды, оптически более плотной, в среду, оптически менее плотную. Наблюдения ведут одновременно за тремя пучками: падающим, отраженным и преломленным.

С увеличением угла падения доля отраженного света от плоской поверхности стекла возрастает, а преломленного — убывает. Как только угол падения достигнет некоторого предельного значения (42°), преломленный пучок скользит вдоль плоской грани полуцилиндра и при незначительном увеличении угла падения исчезает совсем. При этом яркость отраженного пучка резко возрастает и становится одинаковой с яркостью падающего пучка.

При дальнейшем увеличении угла падения наблюдается только отраженный пучок. Он выходит из стекла без преломления и оставляет на поверхности диска хорошо видимый след (рис. 2-27). Это явление называют полным отражением света.

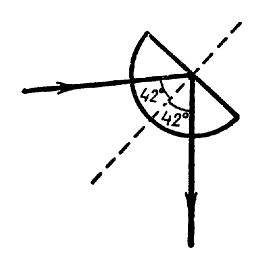


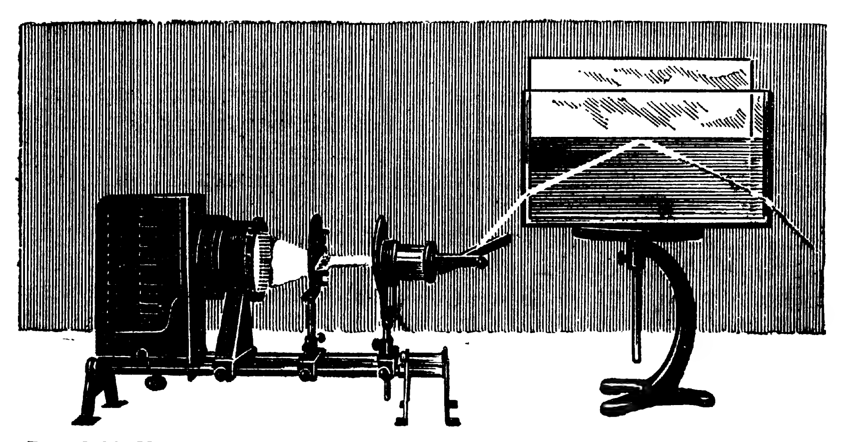
Рис. 2-27. Полное отражение светового пучка в стеклянном полуцилиндре.

Учащимся сообщают, что полное отражение находит широкое применение в различных оптических приборах, в частности световодах. Простейшую модель световода демонстрируют на установке, собранной по рисунку 2-28.

Рядом с проекционным аппаратом на подъемном столике помещают стеклянную ванну из листового органического стекла или аквариум. В ванну наливают слой воды глубиной 7—8 см. Перед конденсором проекционного аппарата ставят горизонтально раздвижную щель, а на оправу объектива надевают плоское зеркало. С помощью зеркала направляют узкий пучок света на боковую стенку ванны. В воде пучок преломляется, а затем полностью отражается от поверхности воды и выходит из ванны с противоположной стороны, испытав еще раз преломление. Чтобы лучше видеть след пучка, в ванну вносят белый экран или подливают раствор флюоресцина.

Изменяя с помощью зеркала угол падения, демонстрируют многократное полное отражение пучка от поверхности воды и дна ванны — модель распространения света в световоде (рис. 2-29).

Предыдущий опыт следует продолжить с U-образной трубкой, наполненной керосином или водой (рис. 2-30)[1]. Для этого раздвижную щель в проекционном аппарате заменяют диафрагмой с круглым отверстием. Выходящий пучок света с помощью зеркала направляют вертикально вниз. В пучок света вносят трубку с жидкостью так, чтобы он входил только в одно колено.


Рис. 2-28. Установка для демонстрации полного отражения света в воде.

[1] Вместо стеклянной трубки можно взять прозрачную хлорвиниловую трубку с водой.

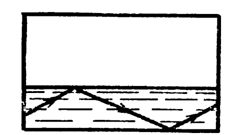
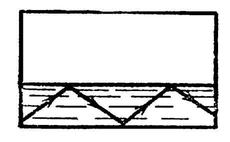
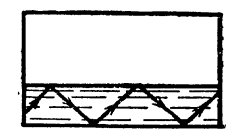
  

Рис. 2-29. Многократное полное отражение светового пучка в воде.

При этом жидкость в трубке начинает светиться по всей длине, как будто свет распространяется не прямолинейно, а криволинейно в соответствии с кривизной трубки.

Наблюдаемое явление объясняют полным отражением света на границе «стекло — воздух» и частичным рассеиванием света. Многократное отражение на границе «керосин — стекло» (или «вода — стекло») не имеет значения ввиду малого различия в показателях преломления этих сред.

Для выразительности опыта при входе света в жидкость ставят красный светофильтр *а*. Тогда жидкость в трубке светится красным светом. Позади трубки необходимо поставить темный экран и слегка затемнить класс.

Наконец, полезно продемонстрировать в качестве экспериментальной задачи простой опыт с закопченным телом. Металлический шар или стеклянную круглодонную колбу коптят до урока над пламенем спиртовки, заправленной скипидаром, а затем опускают в прозрачный сосуд с водой и в таком виде ставят на демонстрационный стол. Учащиеся видят блестящий металлический предмет, не подозревая, что он покрыт копотью. Затем шар вынимают из воды, и эффект исчезает.

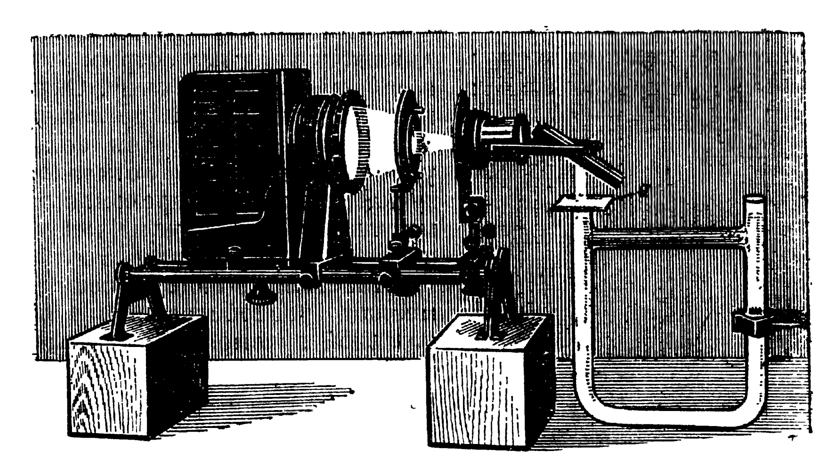


Рис. 2-30. Демонстрация полного отражения света в трубке с водой; *а* — светофильтр.

Наблюдаемое явление учащиеся должны суметь объяснить полным отражением света от слоя воздуха, облегающего поверхность шара, не смачиваемого водой.

В этом опыте вместо закопченного тела можно взять стеклянную воронку. Узкий конец воронки предварительно закрывают резиновой пробкой (или пальцем) и погружают воронку в воду трубкой вверх, следя за тем, чтобы из нее не вышел воздух.

При наблюдении сбоку через стенку сосуда с водой часть воронки, заполненная воздухом, кажется блестящей. Если из воронки вынуть пробку (или отпустить палец), то явление полного отражения исчезает.

ОПЫТ 74. ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В ПРИЗМЕ

Оборудование: 1) диск оптический, 2) аппарат проекционный, 3) диафрагмы с одной раздвижной и с двумя щелями, 4) пластинка и призма стеклянные, 5) светофильтр, 6) диапозитив.

На оптическом диске укрепляют стеклянную пластинку, имеющую форму трапеции. Вершина острого угла в 45° должна немного выступать за центр диска (рис. 2-31). На грань пластинки, играющей роль призмы, направляют узкий горизонтальный пучок света, как это делалось в предыдущих опытах (см. рис. 2-24). Пучок света, испытав двойное преломление, выходит в воздух, заметно отклонившись от первоначального направления. Угол отклонения отсчитывают по градусным делениям диска приблизительно.

Поворачивая медленно диск с призмой вокруг горизонтальной оси, показывают, что угол отклонения преломленного пучка изменяет свою величину. Он достигает минимального значения в том случае, когда угол входа пучка равен углу выхода.

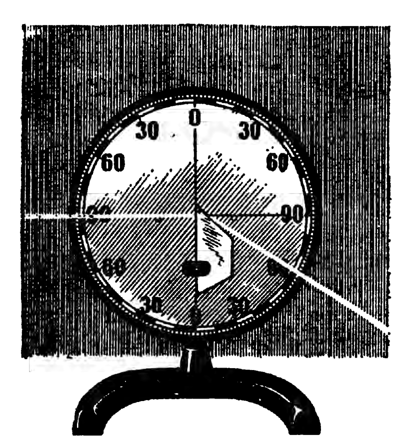


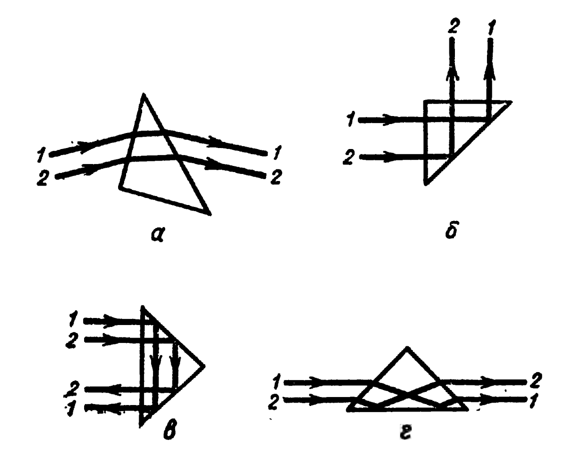
Рис. 2-31. Демонстрация преломления светового пучка в призме.

Затем в центре диска устанавливают пластинку острым углом в 60° и повторяют опыт. Оказывается, чем больше преломляющий угол призмы, тем больше угол наименьшего отклонения пучка. Для призм с преломляющими углами 45 и 60° углы наименьшего отклонения равны 25 и 40°.

Пластинку в виде трапеции заменяют равнобедренной прямоугольной призмой. Ее укрепляют на диске так, чтобы грань, лежащая против прямого угла, совпала с диаметром диска.

Раздвижную щель в проекционном аппарате заменяют само-

Рис. 2-32. Преломление и полное отражение световых пучков в призме.



дельной диафрагмой с двумя щелями, укрепленной в рамке для диапозитивов. Расстояние между щелями должно быть приблизительно 15 мм.

Два узких горизонтальных пучка света направляют на призму, причем на пути одного пучка ставят красный светофильтр.

Вначале пучки света направляют на катет призмы под некоторым острым углом и наблюдают обычное преломление света. Преломленные пучки отклоняются в сторону основания призмы (рис. 2-32, *а*).

Затем пучки направляют перпендикулярно к одному из катетов. Войдя в призму без преломления, пучки падают на гипотенузу под углом 45°. Здесь происходит полное отражение, так как угол падения больше предельного. Отраженные пучки выходят из призмы перпендикулярно второму катету и потому не изменяют своего направления (рис. 2-32, *б*). Таким образом призма поворачивает пучки света на 90°.

После этого пучки направляют перпендикулярно грани, лежащей против прямого угла (гипотенузе призмы). Пучки проходят эту грань без изменения направления, дважды отражаются и выходят из призмы, как показано на рисунке 2-32, *в*, причем пучки меняются местами: верхний пучок становится нижним.

Наконец, пучки направляют параллельно основанию (гипотенузе) призмы на один из ее катетов. После двойного преломления и однократного полного отражения пучки выходят из призмы по тому же направлению, поменявшись местами (рис. 2-32, *г*).

Далее показывают применение наблюдавшихся выше явлений для переноса изображения с помощью призм. Для этого вначале получают на экране изображение какого-либо диапозитива. Затем к объективу подносят призму полного отражения и располагают так, как показано на рисунках 2-32, *б*, *в*, *г*. При этом изображение перемещается то на потолок, то на противоположную стену, то остается на экране, но перевертывается на 180°.

ОПЫТ 75. ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В ЛИНЗАХ

Оборудование: 1) прибор для изучения законов оптики, 2) аппарат проекционный, 3) линзы полые наливные — двояковыпуклая и двояковогнутая, 4) ванна стеклянная (или аквариум) размером 35×16×20 см, 5) штатив универсальный, 6) насыщенный раствор поваренной соли.

Прибор для изучения законов геометрической оптики (рис. 2-33) устанавливают на демонстрационном столе совместно с осветителем от универсального аппарата, как показано на рисунке 2-34. Объектив аппарата снимают и из конденсора вынимают переднюю линзу.

С помощью оставшейся линзы получают параллельный пучок света, который направляют на щелевое устройство прибора. Экран прибора располагают в пучке так, чтобы свет, пройдя сквозь открытые щели, давал на экране по всей его длине четкие параллельные узкие полосы.

Средняя полоса должна проходить через отметку, нанесенную на конце экрана. Практически это достигается путем небольшого вращения экрана вокруг вертикальной и горизонтальной осей и перемещения линзы конденсора относительно источника света.

Ввиду того что нить проекционной лампы имеет значительные размеры, световые полосы на экране получаются немного расходящимися. Чтобы устранить этот недостаток, после конденсора устанавливают прямоугольную диафрагму — рамку для стеклянных диапозитивов размером 45×60 мм.

В щелевое устройство прибора вставляют плоские зеркала и светофильтр. На экране прибора, под четвертой отметкой, уста-

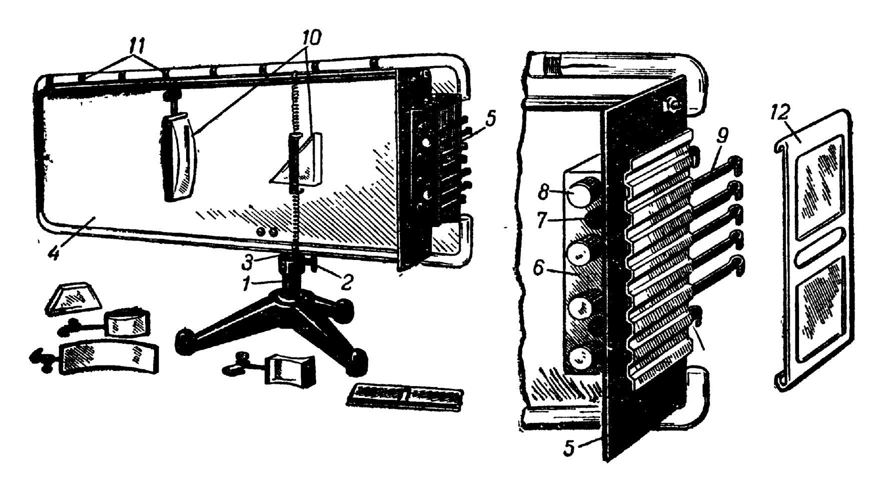


Рис. 2-33. Прибор для изучения законов оптики:

1 — подставка; *2* — стопорный винт; *3* — стержень; *4* — щит-экран; *5* — щитовое устройство; *6* — коробка со щелями; *7* — цилиндрическое отверстие; *8* — головка цилиндрической оправы, в которую вмонтировано плоское зеркало; *9* — передвижные шторки в щелях; *10* — оптика; *11* — отметки на экране; *12* — светофильтр.

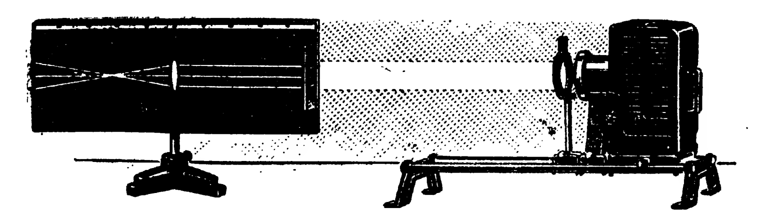


Рис. 2-34. Установка для демонстрации преломления света в линзах.

навливают модель собирающей линзы с фокусным расстоянием 140 мм [1]. С подготовленной установкой в затемненном классе демонстрируют следующие опыты:

1. Открывают среднюю щель и получают на экране белую полоску, изображающую главную оптическую ось линзы. Затем открывают соседние две щели и с помощью плоских зеркал направляют цветные (красный и зеленый) пучки вдоль побочных оптических осей линзы (рис. 2-35, *а*). Обращают внимание на то, что все три пучка проходят оптический центр линзы почти без изменения своего направления.

2. На линзу направляют три пучка, параллельные главной оптической оси. Пройдя линзу, пучки пересекаются в одной точке — главном фокусе линзы (рис. 2-35, *б*). С помощью демонстрационного метра измеряют главное фокусное расстояние линзы; оно оказывается равным примерно 14 см или двум делениям шкалы экрана. После этого пучки делают немного сходящимися, а затем расходящимися. В первом случае точка пересечения пучков оказывается правее, а во втором — левее главного фокуса.

3. Боковые пучки направляют на линзу так, чтобы они предварительно пересекли главную оптическую ось в точке, лежащей перед линзой. Если эта точка совпадает со вторым главным фокусом, то после линзы пучки идут параллельно (рис. 2-35, *в*). В противном случае пучки получаются сходящимися, либо расходящимися.

Опыт второй повторяют с двояковыпуклой линзой, имеющей фокусное расстояние 70 мм, и устанавливают связь между радиусом кривизны преломляющих поверхностей линзы и ее фокусным расстоянием.

Двояковыпуклую линзу заменяют двояковогнутой и демонстрируют аналогичную серию опытов, разделив их на три случая:

1) Вначале пучки света направляют через оптический центр линзы. Пучки проходят линзу, сохраняя первоначальное направление (рис. 2-35, *г*). Боковой сдвиг у крайних пучков оказывается едва заметным. Последнее объясняется тем, что середина у рассеивающей линзы тоньше, чем у собирающей.

---

[1] На всех рисунках линзы и зеркала изображены на тех местах, на которых они должны быть при демонстрации соответствующего опыта.

2) На линзу направляют три параллельных пучка. Пройдя линзу, пучки расходятся в разные стороны, причем каждый пучок постепенно расширяется и поэтому быстро уменьшается его яркость (рис. 2-35, *д*). Большая ширина пучков затрудняет определение их направления. Чтобы определить положение главного фокуса, приходится за направление пучка принимать среднюю линию полосок на экране. Точка пересечения этих линий с главной оптической осью линзы будет первым мнимым фокусом линзы. Измеряют величину главного фокусного расстояния.

3) Пучки света направляют на линзу так, чтобы их продолжение за линзу проходило через главный фокус линзы. После линзы пучки идут параллельно главной оптической оси (рис. 2-35, *е*). Учащиеся должны твердо запомнить ход этих пучков через линзы, так как их обычно применяют для построения изображений.

После этого демонстрируют опыты, раскрывающие зависимость главного фокусного расстояния линзы от относительного показателя преломления вещества, из которого сделана линза. Берут две наливные линзы — двояковыпуклую и двояковогнутую. Пустые линзы поочередно вносят в параллельный пучок света, полученный с помощью осветителя от проекционного аппарата. Свет проходит обе линзы без изменения направления.

Линзы заливают водой и наблюдают действие обеих линз. У собирающей линзы измеряют фокусное расстояние, приблизительно равное 16 см.

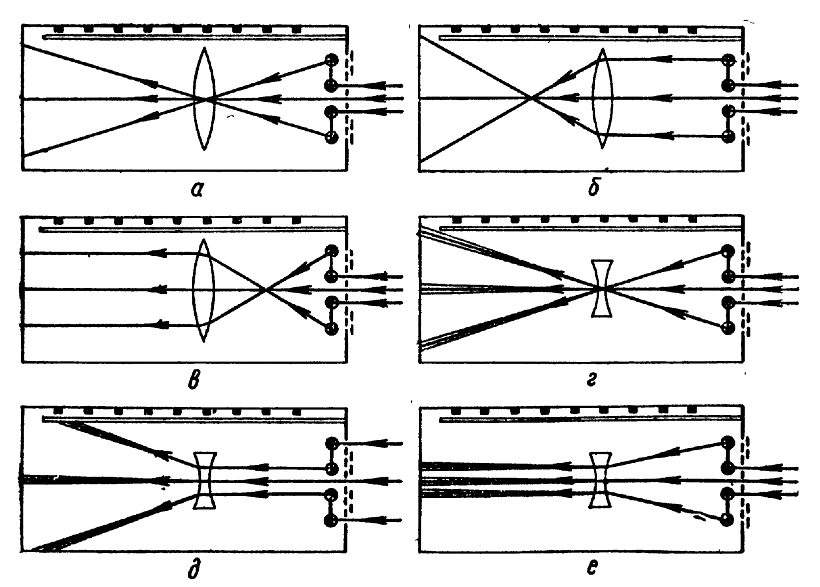


Рис. 2-35. Преломление световых пучков в собирающей и рассеивающей линзах.

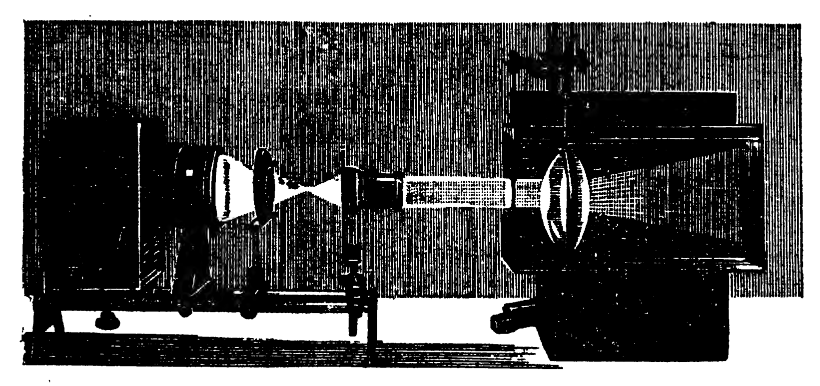


Рис. 2-36. Демонстрация преломления света в воздушной линзе, погруженной в воду.

Затем в двояковыпуклую линзу наливают насыщенный раствор поваренной соли и снова измеряют главное фокусное расстояние. Оно оказывается меньше первоначального.

Двояковыпуклую линзу, заполненную жидкостью, переносят в ванну с водой, подкрашенной флюоресцином, и освещают параллельным пучком света. Диаметр пучка должен быть меньше диаметра линзы. Такой пучок получают с помощью объектива, проецируя на ванну изображение круглого отверстия диафрагмы.

В результате изменения оптической плотности окружающей среды главное фокусное расстояние линзы увеличивается.

После этого жидкость из линз выливают и пустые линзы поочередно погружают в ванну с водой. Двояковыпуклая воздушная линза в воде оказывается рассеивающей, а двояковогнутая — собирающей (рис. 2-36).

ОПЫТ 76. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЛИНЗ

Оборудование: 1) линзы собирающая и рассеивающая с фокусным расстоянием 15—25 см из набора линз и зеркал, 2) осветитель от проекционного аппарата, 3) экран настольный, 4) метр демонстрационный.

Корпус осветителя с проекционной лампой, собирающую линзу на подставке и экран располагают на демонстрационном столе согласно рисунку 2-37. Линзу устанавливают от лампы на таком расстоянии, чтобы за линзой получился параллельный пучок света.

Раскрывают корпус осветителя и с помощью демонстрационного метра измеряют расстояние между линзой и нитью лампы, т. е. главное фокусное расстояние линзы. После этого демонстрируют следующие виды изображений:

1. Лампу отодвигают на возможно большее расстояние от линзы, что соответствует удаленному предмету. Передвигая экран, получают уменьшенное, обратное изображение нити. Издали оно

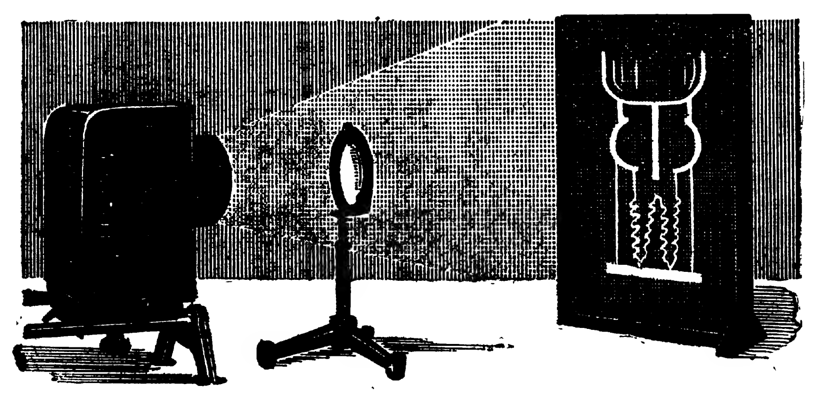


Рис. 2-37. Демонстрация изображения нити лампы накаливания при помощи собирающей линзы.

кажется светящейся точкой. С помощью демонстрационного метра измеряют расстояние от линзы до изображения. Обнаруживают, что оно расположено примерно в главной фокальной плоскости линзы.

2. Лампу приближают к линзе на расстояние, немного большее двойного фокусного расстояния. Для получения четкого изображения экран приходится немного отодвинуть от линзы. Изображение получается по-прежнему действительным, обратным и уменьшенным. Несмотря на значительное приближение предмета, его изображение мало удалилось от линзы и лежит между главным и двойным фокусами.

3. Лампу устанавливают на двойном фокусном расстоянии от линзы. Отодвигая еще дальше экран, получают действительное, обратное изображение, равное по величине предмету. Снова измеряют расстояние до изображения и убеждаются, что оно равно двойному фокусному расстоянию линзы.

4. Лампу располагают от линзы на расстоянии больше фокусного, но меньше двойного фокусного расстояния. Добиваются четкого действительного изображения на экране. Оно получается обратным, увеличенным и расположенным за двойным фокусным расстоянием. Показывают, что, чем ближе лампа расположена к главному фокусу, тем изображение больше и находится дальше от линзы. При очень больших размерах изображения его проецируют прямо на стену или проекционный экран.

5. Лампу устанавливают в главном фокусе линзы. Перемещая экран, убеждаются в том, что действительное изображение не получается ни при каком расстоянии: свет после линзы распространяется параллельным пучком. Чтобы обнаружить пучок, надо задымить воздух или расположить экран в пучке так, чтобы пучок «скользил» по экрану.

6. Наконец, лампу располагают перед линзой на расстоянии, меньшем фокусного расстояния. Показывают, что в этом случае

получить действительное изображение невозможно, так как после линзы пучок становится расходящимся.

Чтобы увидеть мнимое изображение, лампу с линзой поворачивают в сторону учащихся и просят их посмотреть на лампу через линзу. При этом напряжение на лампе уменьшают, чтобы не ослеплять глаза учащихся. Изображение кажется прямым и увеличенным. Приближая линзу к лампе, а затем отодвигая ее, показывают, как в первом случае изображение уменьшается, во втором — увеличивается.

Собирающую линзу заменяют рассеивающей и на опыте убеждаются в том, что при любом положении лампы рассеивающая линза дает изображение мнимое, прямое, уменьшенное и лежащее с той же стороны, что и предмет.

Каждый рассмотренный выше опыт рекомендуется сопровождать построением соответствующего изображения на классной доске.

ОПЫТ 77. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ФОТОАППАРАТА

Оборудование: 1) фотоаппарат, 2) линза двояковыпуклая на подставке, 3) аппарат проекционный, 4) экран полупрозрачный, 5) негатив, 6) лист картона с круглым отверстием диаметром 30—40 мм.

За демонстрационный стол сажают ученика и освещают его лицо светом от проекционного аппарата или лампы с рефлектором. Перед ним устанавливают на столе собирающую линзу на подставке и полупрозрачный экран, выполняющий роль матового стекла в фотоаппарате (рис. 2-38). Линзу поворачивают так, чтобы ее оптическая ось была направлена на «фотографируемый» объект. Передвигая линзу относительно экрана, добиваются четкого действительного и обратного изображения лица.

Линзу закрывают листом картона с круглым отверстием, выполняющего роль диафрагмы. Наблюдают уменьшение освещенности и увеличение глубины резкости изображения. Закрывая и открывая линзу листом картона, демонстрируют экспозицию при фотографировании.

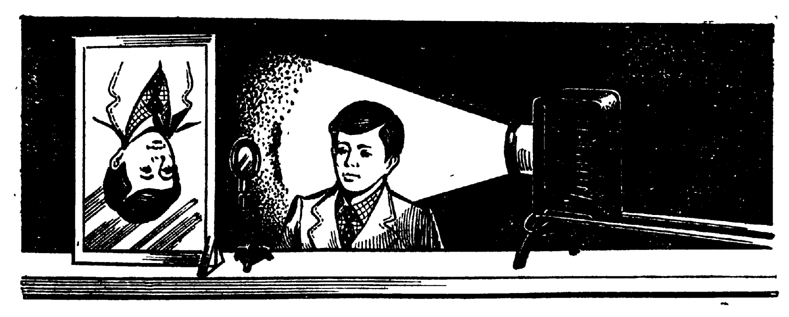


Рис. 2-38. Демонстрация принципа действия фотоаппарата.

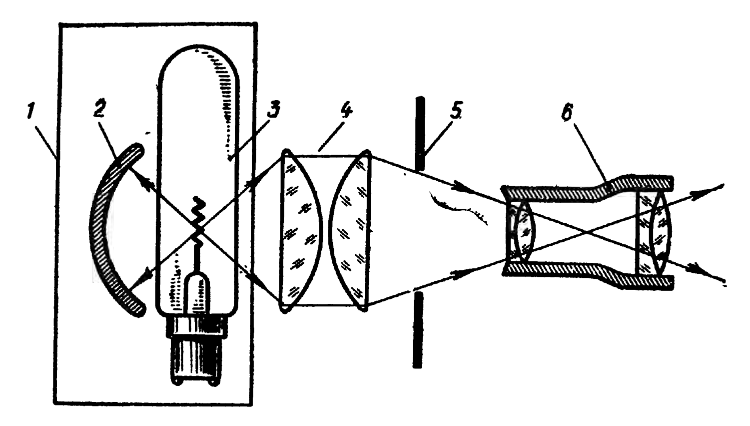


Рис. 2-39. Схема оптической части проекционного аппарата:
1 — корпус осветителя; *2* — рефлектор; *3* — лампа; *4* — конденсор; *5* — рамка с диапозитивом; *6* — объектив.

Учащихся знакомят с устройством простейшего фотоаппарата, сопоставляя принцип его действия с только что рассмотренной установкой.

В заключение учащимся показывают какой-либо негатив, проецируя его изображение на экран.

ОПЫТ 78. УСТРОЙСТВО И ДЕЙСТВИЕ ПРОЕКЦИОННОГО АППАРАТА

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) экран проекционный.

Проекционный аппарат, например ФОС-67, устанавливают на демонстрационном столе и показывают его основные части (рис. 2-39): корпус осветителя *1* с источником света *3* и рефлектором *2*, конденсор *4* разборный на стойке и рейторе, рамка для установки диапозитивов *5*, объектив *6*, укрепленный с помощью ширмы на стержне и рейторе. Показывают возможность перемещения всех деталей вдоль скамьи, состоящей из двух направляющих труб и выдвижных стержней. Основное внимание уделяют оптической части, схему которой вычерчивают на классной доске.

Объектив аппарата состоит из двух линз, благодаря чему он в значительной мере лишен тех недостатков, которые присущи отдельным линзам. Конденсор собран из двух плоско-выпуклых короткофокусных линз, обращенных сферическими поверхностями друг к другу. При таком расположении линз потери света на отражение наименьшие. Рефлектор в виде вогнутого короткофокусного зеркала позволяет лучше использовать свет проекционной лампы: ее нить расположена в центре кривизны зеркала. Затемняют класс и показывают действие аппарата.

Включают осветитель и, передвигая объектив, добиваются четкого изображения диапозитива на экране. Обращают внимание на положение диапозитива: чтобы получить прямое и увели-

ченное изображение, диапозитив устанавливают в перевернутом положении между главным фокусом и двойным фокусным расстоянием объектива.

Изменяют расстояние от диапозитива до экрана. Передвигая объектив, снова получают резкое изображение. Наблюдают изменение величины и яркости изображения.

Чтобы подчеркнуть роль конденсора, его вынимают из аппарата и наблюдают резкое уменьшение яркости изображения и неравномерную его освещенность. Снова вставляют конденсор и получают нормальное изображение.

После этого учащихся знакомят с внешним видом эпидиаскопа, а затем объясняют его устройство.

ОПЫТ 79. ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Оборудование: 1) модель глаза разборная, 2) таблица учебная «Разрез глаза», 3) аппарат проекционный, 4) линзы собирающие и рассеивающие, 5) машина центробежная червячная со стробоскопическим диском, 6) экран проекционный, 7) светофильтры, 8) диапозитив на стекле, 9) колба с водой.

Разбирают модель глаза на отдельные детали и, показывая учащимся, объясняют их устройство и назначение (рис. 2-40). После этого показывают учебную таблицу, на которой представлено расположение всех деталей глаза в целом (рис. 2-41).

При объяснении строения и действия глаза как оптического аппарата прибегают к аналогии. Внимание учащихся обращают на то, что оболочка глаза играет роль камеры фотографического аппарата; хрусталик — роль объектива; сетчатая оболочка — роль светочувствительной пластинки; зрачок в радужной оболочке — роль диафрагмы.

В фотоаппарате для получения четкого изображения разно удаленных предметов изменяют положение объектива относительно фотопластинки. В глазу же расстояние между хрусталиком и сетчаткой не меняется, но при помощи особых мышц изменяется фокусное расстояние хрусталика (аккомодация): он то сжимается — делается более выпуклым, то растягивается — делается более плоским. Благодаря этому свойству глаза изображение разно удаленных предметов получается всегда на сетчатке.

Сообщают, что у нормального глаза есть предел аккомодации. Нормальный глаз хорошо видит предметы, находящиеся на

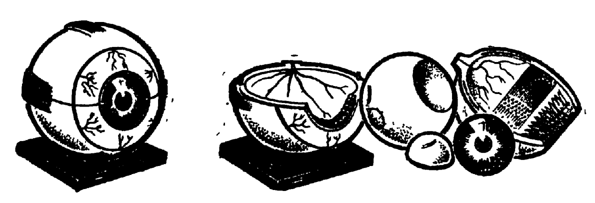
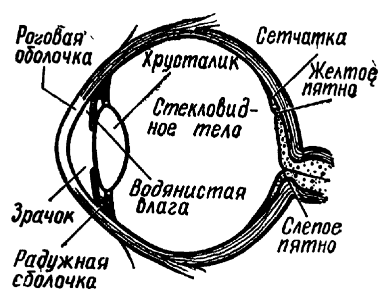


Рис. 2-40. Разборная модель глаза.



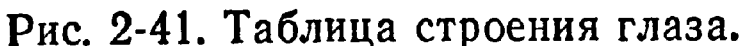


Рис. 2-41. Таблица строения глаза.

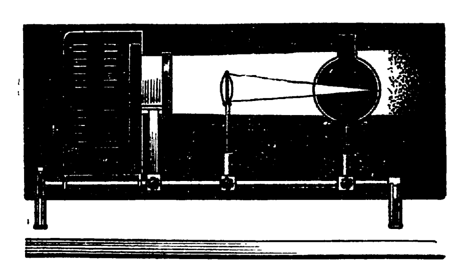


Рис. 2-42. Демонстрация хода светового пучка в модели глаза.

расстояниях от 15 см и дальше, причем 25 см считается расстоянием наилучшего зрения. У ненормального глаза хрусталик не может аккомодировать в указанных пределах. Ненормальное зрение исправляют очками.

Для демонстрации хода светового пучка в глазе собирают установку по рисунку 2-42. На оптической скамье располагают осветитель, однолинзовый конденсор, собирающую линзу на подставке и круглую колбу с водой на подъемном столике. Конденсор располагают так, чтобы выходящий из осветителя пучок света был параллельным. В воду добавляют немного зубного порошка, чтобы хорошо был виден след светового пучка внутри колбы.

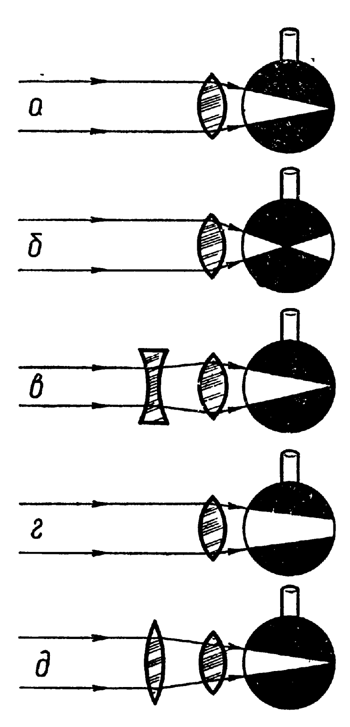


Рис. 2-43. Ход пучка света в нормальном (*а*), близоруком (*б*, *в*) и дальнозорком (*г*, *д*) «глазе».

Вначале показывают ход светового пучка в нормальном глазе. Для этого собирающую линзу, выполняющую роль хрусталика, располагают перед колбой так, чтобы световой пучок сходился на противоположной стенке колбы, выполняющей роль сетчатки глаза (рис. 2-43, *а*).

Затем показывают ход светового пучка в близоруком глазе. Перед колбой располагают линзу с меньшим фокусным расстоянием. Обращают внимание учащихся на то, что теперь световой пучок фокусируется внутри колбы, а не на ее поверхности (рис. 2-43, *б*).

Близорукость глаза исправляют при помощи рассеивающей линзы. Ее располагают впереди модели глаза (рис. 2-43, *в*).

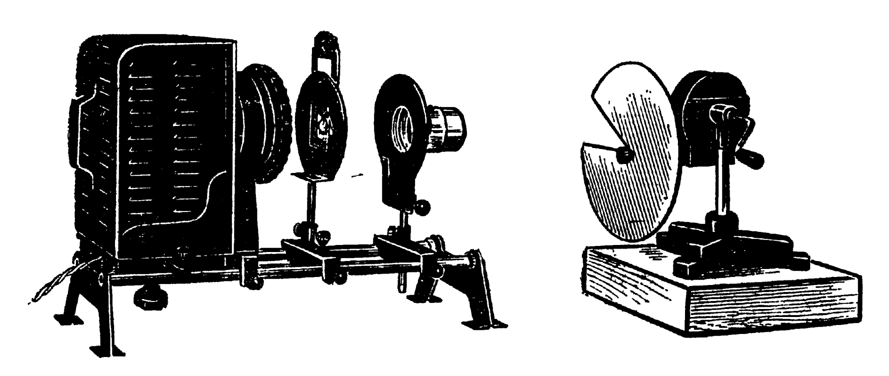


Рис. 2-44. Демонстрация сохранения зрительного впечатления в глазе.

Наконец, демонстрируют ход светового пучка в дальнозорком глазе. Для этого перед колбой располагают длиннофокусную линзу, в результате чего световой пучок фокусируется в воздухе за колбой (рис. 2-43, *г*). Дальнозоркость глаза исправляют при помощи собирающей линзы (рис. 2-43, *д*).

В заключение учащихся знакомят со свойством нашего глаза сохранять в течение некоторого времени световое раздражение. С этой целью демонстрируют следующий опыт.

С помощью проекционного аппарата проецируют на экран изображение какого-либо диапозитива. На пути пучка света, выходящего из проекционного аппарата, располагают стробоскопический диск (картонный диск с вырезом в виде сектора), укрепленный на оси центробежной машины (рис. 2-44). Приводят диск в медленное вращение и наблюдают на экране мелькания изображения. Увеличивают скорость вращения диска: частота мельканий сначала возрастает, а затем они становятся совсем незаметными.

Наблюдаемое явление объясняют тем, что впечатление, возникающее в глазу при световом раздражении, не исчезает мгновенно, когда пучок света перекрывается непрозрачной частью диска, а сохраняется в течение некоторого времени (до 0,1 с). Если перерывы в раздражении следуют друг за другом через промежутки времени, в течение которых сохраняется зрительное впечатление, то они не замечаются глазом и создается непрерывное, длительное впечатление.

Этот опыт полезно продолжить и показать зависимость длительности зрительного впечатления от цвета пучка, вызывающего зрительное раздражение.

В рамку для диапозитивов вставляют два светофильтра — зеленый и синий. Вначале проецируют синий светофильтр. Диск приводят во вращение с такой скоростью, чтобы мелькания синего света на экране стали незаметными. Затем быстро сменяют синий светофильтр на зеленый. На экране снова появляются

мелькания зеленого света. Они исчезают только при увеличении скорости вращения диска.

Диапозитивную рамку со светофильтрами можно установить так, чтобы одновременно проецировались оба светофильтра в виде полосок, разделенных темным промежутком. Тогда можно наблюдать на экране сразу два цвета; при постепенном увеличении скорости вращения мелькания исчезнут сначала у синей полоски, а затем у зеленой.

Опыт показывает, что продолжительность зрительного впечатления для синего света больше, чем для зеленого. Вместо синего светофильтра можно взять красный.

ОПЫТ 80. ХОД ЛУЧЕЙ В МИКРОСКОПЕ

Оборудование: 1) прибор для изучения законов оптики, 2) аппарат проекционный, 3) учебные «Таблицы для X класса».

Предварительно учащихся знакомят с устройством и назначением микроскопа по учебной таблице. Затем переходят к опыту.

Ход пучков света в микроскопе демонстрируют на установке, описанной в опыте 75 (см. рис. 2-34). На щелевое устройство надевают светофильтр. На экране (под третьей отметкой, считая от щелевого устройства) устанавливают малую собирающую линзу с фокусным расстоянием 70 мм (рис. 2-45). Эта линза служит объективом. Плоские зеркала располагают против щелей *1*, *2*, *6* и *7*.

В щелевом устройстве открывают щель *4* и получают на экране белую полоску, изображающую главную оптическую ось объектива. Перемещая немного линзу в вертикальной плоскости, добиваются такого положения, при котором она не изменяет направления белого пучка света. Затем открывают щель *3* и получают окрашенный пучок (например, красный), идущий параллельно главной оптической оси. После этого открывают щель *1* и, поворачивая плоские зеркала, расположенные против первой и второй щелей, направляют окрашенный пучок на оптический центр линзы. Получают изображение побочной оптической оси. Оба пучка пересекаются перед линзой в точке A, которая служит одной из крайних точек рассматриваемого объекта. Она расположена между главным и двойным фокусным расстоянием объектива. Поэтому ее действительное изображение получается в точке A_1 за двойным фокусным расстоянием линзы.

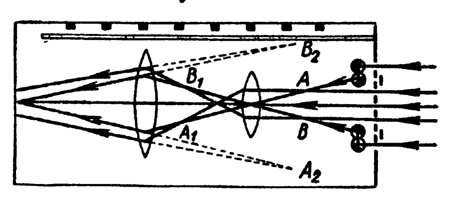


Рис. 2-45. Ход пучков света в микроскопе.

После этого на экране под шестой меткой устанавливают вторую линзу-окуляр с фокусным расстоянием 140 мм. Световые пучки, пройдя вторую линзу, остаются расходящимися, так

как окуляр действует, как лупа. Следует сказать, что далее пучки попадают в глаз наблюдателя, преломляются еще раз в хрусталике и собираются на сетчатке глаза, давая действительное изображение точки. При этом наблюдателю кажется, что пучки выходят из мнимой точки A_2.

Затем демонстрируют ход пучков от другой крайней точки *В*. Пучок, параллельный главной оптической оси, получают от щели *5*, а пучок, проходящий через оптический центр объектива,— с помощью плоских зеркал от щелей *6* и *7*.

Учащимся сообщают, что таким же образом можно получить мнимое изображение других точек. Все они будут располагаться между изображениями точек A_2 и B_2. В результате глаз наблюдателя видит мнимое, увеличенное, обратное относительно объекта изображение, расположенное от глаза на расстоянии наилучшего зрения (25 см для нормального глаза).

§ 2. СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

Включение лазера в систему школьного физического оборудования раскрывает большие возможности для повышения качества многих демонстраций, предусмотренных школьной программой, а также для постановки ряда новых опытов [1].

Излучение лазера по сравнению с тепловыми источниками света выгодно отличается уникальными свойствами: высокой степенью когерентности, монохроматичности, большой яркостью пучка и малой его расходимостью. Эти свойства лазера имеют все необходимое, чтобы улучшить постановку трудных опытов по интерференции, дифракции и поляризации света.

Лазер учебный ЛГ-209 (рис. 2-46) представляет собой газовый гелий — неоновый оптический квантовый генератор, дающий непрерывное излучение мощностью 2—4 мВт. Диаметр пучка лучей у выходного окна — около 2 мм; длина волны излучения — $6{,}328 \cdot 10^{-7}$ м. Прибор питается от сети 220 В и запускается автоматически. На задней стенке установлены тумблер включения и регулятор выходной мощности излучения.

Для демонстрации устройства лазера, наблюдения бокового излучения газоразрядной трубки и юстировки резонатора верхняя часть корпуса сделана откидывающейся (имеется возможность и полностью снять крышку). На передней стенке укреплен кронштейн, размеры которого позволяют быстро и точно устанавливать соосно пучку лазера различные детали,

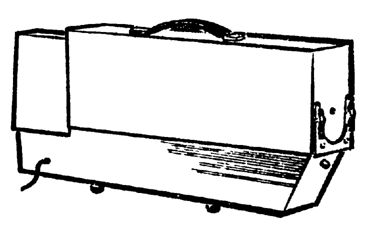


Рис. 2-46. Лазер учебный ЛГ-209.

[1] Учебный лазер ЛГ-209 с принадлежностями модернизирован А. И. Жиряковым и утвержден для промышленного изготовления.

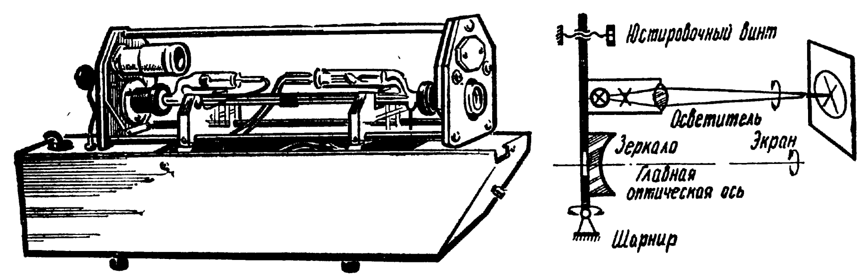


Рис. 2-47. Монтаж излучающей головки и юстировочного приспособления.

Рис. 2-48. Схема устройства юстировочного приспособления.

смонтированные на ширмах-дисках и входящие в школьные наборы по оптике. При помощи двух крепежных винтов кронштейн можно подстраивать так, чтобы пучок лучей проходил точно по центру вставляемых дисков.

Монтаж излучающей головки показан на рисунке 2-47. Для быстрой настройки резонатора в излучающей головке лазера установлено юстировочное приспособление (рис. 2-48). Оно состоит из осветителя с перекрестием (он закреплен на кронштейне, где расположено сферическое зеркало лазера) и экрана с перекрестием (он установлен на раме против сферического зеркала). Вращая юстировочные винты, изменяют наклон осветителя к оси трубки, а вместе с ним и направление излучения осветителя. Как только изображение перекрестия совпадет с перекрестием, нанесенным на экране, так главная оптическая ось зеркала совпадет с осью трубки, и лазер настроен.

В нижней части лазера установлен высоковольтный блок питания, который подает напряжение 1000 В на анод газоразрядной трубки, питает накальную цепь и осветитель юстировочного приспособления. Для безопасности блок питания закрыт сверху изолирующей крышкой.

К школьному лазеру приложен набор по физической оптике, в который включены следующие детали: рейтор для установки лазера на школьной оптической скамье (рис. 2-49); две линзы $F_1 = 17$ мм и $F_2 = 4$ мм; стеклянная пластинка с пятнами туши (установка линзы на лазере и пластинки на стойке показаны на рис. 2-50); зеркальце круглое в оправе с ушками для закрепления в ширме-диске (рис. 2-51).

Необходимые указания по постановке демонстрационных опытов с лазером, предусмотренных программой по волновой оптике, даны в описании опытов.

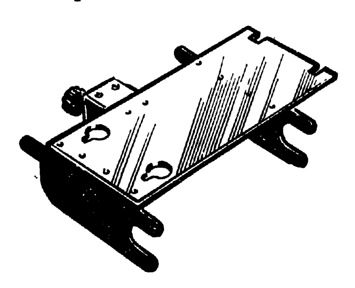


Рис. 2-49. Рейтор для установки лазера на оптической скамье.

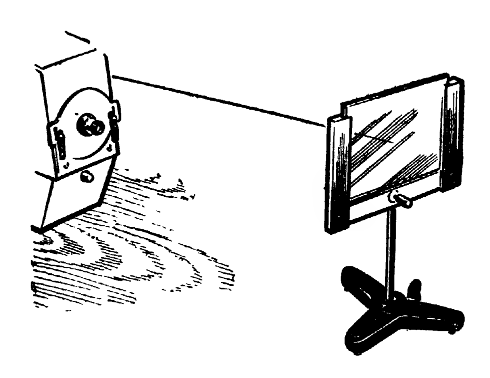


Рис. 2-50. Линза на лазере и стеклянная пластинка на стойке.

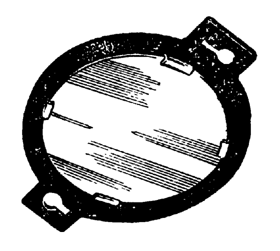


Рис. 2-51. Круглое зеркальце с ушками для закрепления в диске-ширме.

При проведении эксперимента со школьным лазером необходимо соблюдать следующие требования техники безопасности:

1. Включает лазер в электрическую сеть преподаватель или лаборант.
2. Корпус лазера должен быть заземлен.
3. Нельзя направлять пучок лучей лазера в сторону класса, так как это опасно для зрения.
4. Запрещается перемещать по оптической скамье лазер, включенный в электрическую сеть.
5. Запрещается касаться зеркал прибора руками или какими-либо предметами.

ОПЫТ 81. ПОЛУЧЕНИЕ СПЛОШНОГО СПЕКТРА НА ЭКРАНЕ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призмы дисперсионные «Крон» и «Флинт», 3) призма прямого зрения, 4) экран переносный.

Получение яркого и четкого сплошного спектра на экране необходимо не только для демонстрации явления дисперсии, но и для демонстрации линейчатых спектров испускания, спектров поглощения, синтеза спектральных цветов и проведения других опытов.

Установка собирается на скамье проекционного аппарата из осветителя с конденсором, ширмы со щелью, объектива и трехгранной призмы «Флинт», как показано на схеме (рис. 2-52).

Источник света располагают приблизительно в главном фокусе задней линзы конденсора. В образовавшемся после конденсора световом конусе перемещают вдоль оптической оси раздвижную щель и закрепляют ее в таком месте, где сечение светового конуса полностью перекрывает щель. Между «ножами» щели оставляют просвет 1,5—2 мм. С помощью объектива получают на экране, расположенном у другого края демонстрационного

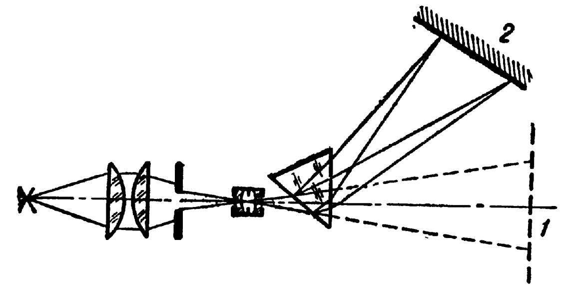


Рис. 2-52. Ход пучков света в установке для демонстрации сплошного спектра (вид сверху).

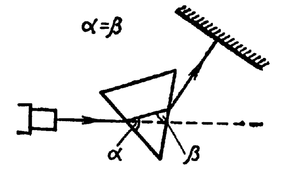


Рис. 2-53. Правильное расположение призмы при демонстрации сплошного спектра.

стола, увеличенное, резкое, равномерно освещенное изображение щели.

После этого перед объективом на подъемном столике устанавливают призму так, чтобы ее преломляющее ребро было параллельно щели, а весь пучок света проходил сквозь грани преломляющего угла. Тогда на экране, переставленном из положения *1* в положение 2, при полном затемнении класса будет хорошо виден сплошной спектр.

Для более точной установки призмы ее слегка поворачивают вокруг вертикальной оси до тех пор, пока угол между пучком света, выходящим из призмы, и главной оптической осью объектива не станет минимальным (метод минимального отклонения преломленного луча) [1]. В таком положении преломленный пучок света будет направлен параллельно основанию призмы и образует внутри ее с боковыми гранями равные углы (рис. 2-53).

Чтобы показать зависимость длины спектра от рода вещества призмы (при одном и том же преломляющем угле), опыт продолжают со второй призмой такого же размера, но «Крон». Призму «Крон» устанавливают на первую так, чтобы их плоскости и ребра совпали, а пучок света из объектива попадал на обе призмы. При этом на экране получаются одновременно два спектра, которые удобно сравнивать: спектр от призмы «Флинт» оказывается более растянутым.

Сплошной спектр получается значительно ярче и отчетливее, если пользоваться призмой прямого зрения. В этом случае экран устанавливают не в стороне от проекционного аппарата, а на продолжении главной оптической оси конденсора и объектива. В остальном подготовка установки для получения спектра с призмой прямого зрения не отличается от описанной выше. Разумеется, учащимся надо кратко рассказать об устройстве призмы прямого зрения и по чертежу пояснить ход крайних пучков видимого спектра (красного и фиолетового) (рис. 2-54). При этом

[1] При разложении в спектр белого света указанный угол отсчитывается по одному из цветных пучков, например желтому.

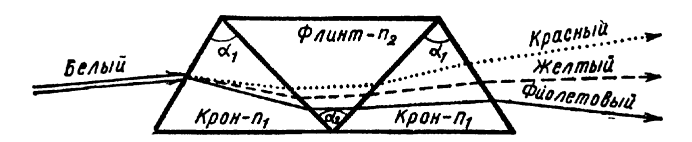


Рис. 2-54. Схема устройства и ход пучков света в призме прямого зрения.

можно указать, что в такой призме углы α_1 и α_2 и показатели преломления n_1 и n_2 подобраны так, чтобы один из цветных пучков выходил из призмы по направлению падающего пучка, а дисперсия получалась бы по возможности более значительной.

Если в школе нет демонстрационной призмы прямого зрения, можно воспользоваться небольшой призмой из лабораторного спектроскопа прямого зрения. Призма легко вынимается. Для проведения опытов ее надо укрепить в деревянной или картонной оправе с ширмой, которая бы перекрывала выходное отверстие объектива проекционного аппарата.

ОПЫТ 82. СЛОЖЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЦВЕТОВ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма дисперсионная «Флинт» или призма прямого зрения, 3) прибор для сложения цветов спектра, 4) чаша кристаллизационная 12,5 см или стакан низкий НН-250 с водой, 5) экран переносный.

Получив с помощью проекционного аппарата и призмы «Флинт» яркий и четкий сплошной спектр на переносном экране, помещают за призмой прибор для сложения цветов спектра (рис. 2-55). Установку собирают по схеме, изображенной на ри-

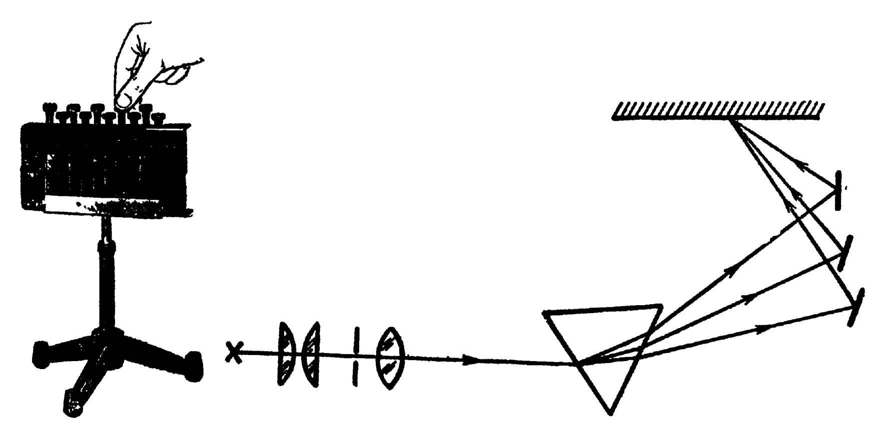


Рис. 2-55. Прибор для сложения цветов спектра.

Рис. 2-56. Схема установки для сложения спектральных цветов.

сунке 2-56[1]. Расстояние от прибора до призмы подбирают таким, чтобы весь спектр (от красных до фиолетовых лучей) попадал на зеркала прибора.

Вследствие отражения пучков от зеркал прибора на экране, перемещенном теперь в новое положение, получают отдельные одноцветные полосы. Не меняя установки, осторожно поворачивают за головки зеркала так, чтобы все отраженные к экрану цветные пучки света собрались в одну узкую полоску. Цвета спектра, накладываясь один на другой, дадут на экране белый цвет, близкий к тому, какой дает источник света.

Поочередно накладывая на экране цветные полосы друг на друга, можно демонстрировать смешение двух или нескольких отдельных цветов, например желтого с синим (получается зеленый), красного с желтым (получается оранжевый) и т. д.

Собирая на экране в одну полоску все цвета спектра, кроме одного, например красного, получают сравнительно яркую зелено-голубую полоску. Рядом с ней помещают красную. Обращают внимание на то, что эти цвета являются дополнительными: при наложении их друг на друга получается белый цвет.

Таким же приемом показывают образование еще нескольких других пар дополнительных цветов.

Сложение спектральных цветов можно продемонстрировать и при помощи цилиндрической линзы. В качестве последней можно воспользоваться чашей кристаллизационной (или стаканом низким НН-250), наполненной чистой водой. Чашу помещают на подъемном столике за призмой так, чтобы на экране получилось вместо спектра отчетливое белое изображение щели.

ОПЫТ 83. ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛОС ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ОТ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с лампой накаливания или дуговой лампой, 2) бипризма Френеля на диске-ширме, 3) щель раздвижная на диске-ширме, 4) лазер учебный ЛГ-209, 5) линза $F=17$ мм (глазная линза от окуляра микроскопа), 6) экран.

Для проведения опыта применяют бипризму Френеля, входящую в комплект по дифракции и интерференции.

Этот опыт является очень важным в методическом отношении. Он дает возможность выяснить волновую природу света. Уже из принципиальной схемы опыта (рис. 2-57) видно, что явление обусловливается наличием двух мнимых изображений щели (когерентных «источников света»), образуемых бипризмой.

После зарисовки этой схемы на классной доске и соответствующего объяснения собирают установку по рисунку 2-58. На оптической скамье располагают закрепленные на дисках-ширмах раздвижную щель и бипризму Френеля.

[1] На рисунке 2-56 для простоты показаны лишь три зеркала вместо десяти.

При помощи кондесора получают на поверхности ширмы с раздвижной щелью, расположенной на главной оптической оси, яркое светящееся пятно от источника света. Пятно должно быть такого размера, чтобы оно полностью покрывало щель.

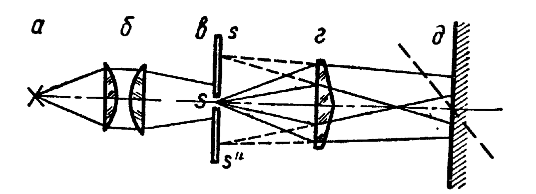


Рис. 2-57. Ход пучков света в установке с бипризмой Френеля:
а — источник света; *б* — конденсор; *в* — щель; *г* — бипризма; *д* — экран.

Получив за щелью узкий пучок лучей, направляют его на ребро бипризмы, установленной приблизительно на расстоянии 6 см от щели. Ребро бипризмы должно быть расположено строго параллельно щели и находиться с ней в одной вертикальной плоскости, проходящей вдоль главной оптической оси конденсора. Это легко осуществить при помощи рейтеров с приспособлением для малых перемещений и дисков-ширм с вращающимися кольцами.

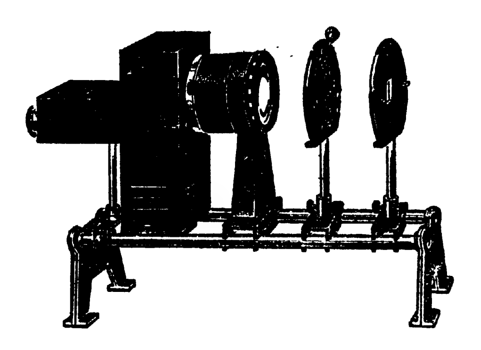


Рис. 2-58. Установка с бипризмой и дуговой лампой.

Наконец, не изменяя больше установки, уменьшают постепенно ширину щели до 0,1—0,05 мм [1]. Тогда на экране, расположенном от бипризмы на расстоянии 1,5—2 м, образуется изображение в виде цветных интерференционных полос. Если применить светофильтр, например светлоокрашенный оранжевый или зеленый, то в монохроматическом свете на экране получается семейство чередующихся светлых и темных параллельных полос (рис. 2-59).

После этого экран слегка поворачивают на некоторый угол в сторону класса (на рисунке 2-57 такое положение экрана показано пунктиром) и получают «растянутое» изображение интерференционных полос шириной 3—4 см. Чтобы все учащиеся могли видеть это явление издали, полезно перед экраном поставить конденсорную линзу большого диаметра.

Изображение полос на экране можно несколько улучшить, если изменить немного схему опыта (рис. 2-60). Установка будет отличаться от прежней только тем, что после бипризмы поставлена диафрагма *д*, а рядом с ней — цилиндрическая рассеиваю-

[1] Такую ширину щели легко установить с помощью лезвия от безопасной бритвы (0,1 и 0,08 мм толщиной).

щая линза *е* ($F=-50$ мм). Она позволяет «растянуть» на экране, расположенном, например, на расстоянии 3,5 м от бипризмы, изображение полос интерференции до 2—2,5 см.

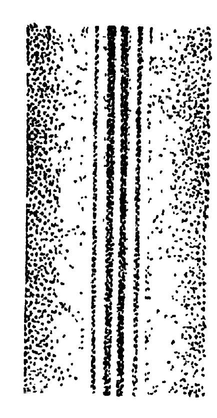


Рис. 2-59. Линии интерференции от бипризмы.

Если же экран повернуть относительно оптической оси на 45°, то ширина полос увеличится примерно до 8,5 см.

Надо иметь в виду, что при подготовке опыта четкая картина интерференции получается на экране не сразу. Чаще всего сначала появляется светлая, размытая в середине полоса (рис. 2-61). Это служит первым признаком неправильной установки: не соблюдена параллельность расположения щели и ребра призмы относительно друг друга. Чтобы исправить установку, надо слегка повернуть щель или бипризму относительно главной оптической оси.

Большое значение в этом опыте имеет мощность источника света. Если есть возможность, то лучше применить дуговую лампу. Лампа накаливания дает лучшие результаты, если ее повернуть примерно на 80—85° вокруг вертикальной оси и расположить тело накала (спираль) «ребром» в направлении главной оптической оси конденсора.

При других, менее благоприятных условиях этот важный опыт даже при хорошем затемнении класса не удовлетворяет полностью требованиям видимости для всех учащихся.

Однако можно значительно улучшить качество опыта, если его поставить с учебным лазером по схеме, приведенной на рисунке 2-62.

Эта демонстрация, кроме ознакомления с самим явлением интерференции света, позволяет также изучить один из методов

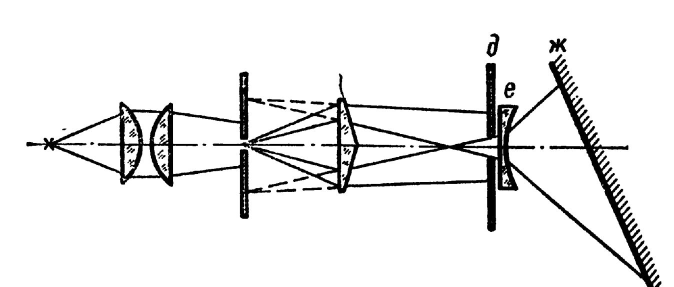


Рис. 2-60. Ход пучков света в установке с бипризмой и цилиндрической линзой:
д — диафрагма; *е* — цилиндрическая линза; *ж* — экран.

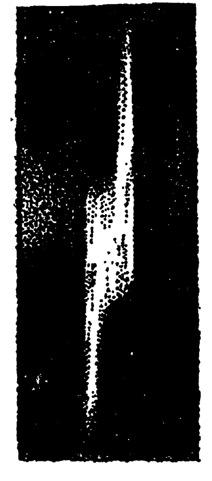


Рис. 2-61. Картина интерференции при неправильной установке. →

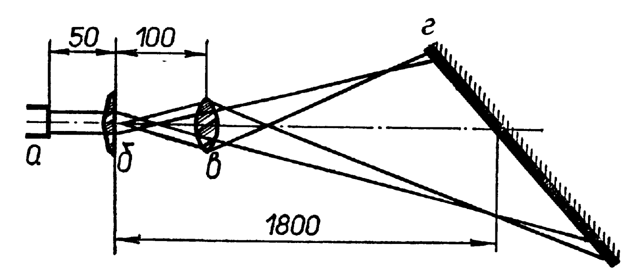


Рис. 2-62. Схема установки с лазером для демонстрации полос интерференции:
а — лазер ЛГ-209; *б* — бипризма; *в* — линза $F=17$ мм; *г* — экран.

приблизительного измерения длины световой волны. Рассматривая схему (рис. 2-63), можно составить следующее соотношение:

$$\frac{\delta}{d} = \frac{x}{L}.$$

Если на экране первая светлая полоса получится в направлении A, т. е. на расстоянии x ниже оптической оси, то в этом месте в результате наложения двух пучков света от когерентных источников происходит усиление света. Здесь по условию максимума интенсивности интерферирующих пучков

$$\delta = 2n\frac{\lambda}{2} = n\lambda, \qquad \text{где } n = 1.$$

Следовательно, $\frac{\lambda}{d} = \frac{x}{L}$ и длина световой волны $\lambda = \frac{xd}{L}$.

Как видно из чертежа (рис. 2-63), x, L довольно просто можно определить из опыта.

Для определения d (расстояния между мнимыми источниками света) можно воспользоваться геометрическими соображениями (рис. 2-64):

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{d}{2r} \text{ и } n = \frac{\sin\frac{\alpha+\delta}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}}$$

и установить связь между α — преломляющим углом призмы,

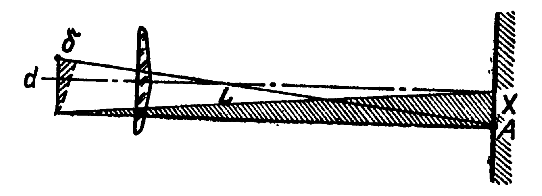


Рис. 2-63 Схема определения длины световой волны с бипризмой Френеля.

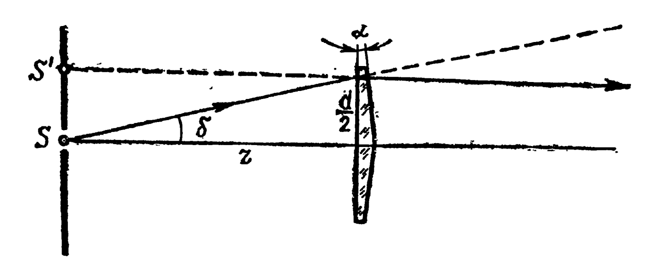


Рис. 2-64. К установлению связи между преломляющим углом призмы, показателем преломления стекла и углом отклонения призмы.

n — показателем преломления стекла и δ — углом отклонения призмы. Для малых углов тангенсы и синусы углов могут быть заменены самими углами. Тогда

$$\delta = \frac{d}{2r} \text{ и } n = \frac{\alpha + \delta}{\alpha} \text{ или } \delta = (n - 1)\alpha.$$

Значит, $d = 2r(n-1)\alpha'$ *.

Таким образом,

$$\lambda = \frac{xd}{L} = \frac{x}{L} 2r(n - 1)\alpha.$$

ОПЫТ 84. ДЕМОНСТРАЦИЯ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Оборудование: 1) аппарат проекционный с лампой накаливания или дуговой лампой, 2) «кольца Ньютона» из набора по дифракции и интерференции света, 3) светофильтр красный или оранжевый, 4) диафрагма на диске-ширме, 5) тренога от универсального штатива, 6) экран-ширма, 7) экран проекционный, 8) лазер учебный ЛГ-209, 9) линза $F = 17$ мм (глазная линза от окуляра микроскопа).

Основной прибор, применяемый в этом опыте, состоит из плоско-выпуклой линзы и плоской пластины, заключенных в оправу так, что плоская пластина прикасается к выпуклой части линзы. На оправе имеются три регулировочных винта. Перед опытом, пользуясь этими винтами, изменяют воздушный зазор между поверхностями линзы и пластины так, чтобы в середине прибора образовались цветные кольца правильной формы диаметром 20—25 мм.

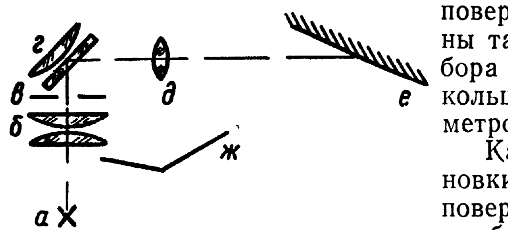


Рис. 2-65. Схема установки для демонстрации колец Ньютона:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — прибор «кольца Ньютона»; *д* — объектив; *е* — экран; *ж* — экран-ширма.

Как видно из схемы установки данного опыта (рис. 2-65), поверхность подготовленного прибора «кольца Ньютона» располагают с наклоном 45°

* r — расстояние от источника света до бипризмы.

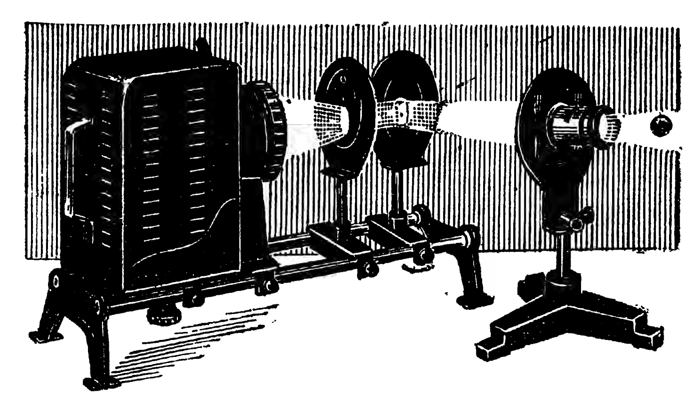


Рис. 2-66. Установка для демонстрации колец Ньютона.

к главной оптической оси конденсора. Затем перемещают прибор вдоль оптической оси и получают на поверхности линзы освещенное круглое пятно. Величина этого пятна должна быть немного больше ясно видимых интерференционных колец.

Чтобы устранить отражение света от второстепенных частей прибора, приводящее к появлению бликов на проекционном экране, между конденсором и прибором устанавливают диафрагму с отверстием 30 мм, а по направлению конуса света, отраженного от поверхности прибора, располагают на треноге объектив. Общий вид установки показан на рисунке 2-66.

Перемещая теперь объектив вдоль пучка лучей, получают на экране четкое изображение интерференционных колец в отраженном свете. При расстоянии от аппарата до экрана, равном 3 м, большее кольцо на экране будет иметь размер приблизительно 50 см. Кольца удобнее наблюдать в монохроматическом свете. Поэтому на пути пучка лучей, падающих на прибор, следует поместить светофильтр.

Целесообразно спроецировать на экран одновременно два изображения колец — в отраженном и проходящем свете. Для этого рекомендуется к ранее собранной установке добавить еще одну линзу в качестве второго объектива (рис. 2-67). Линзу с главным фокусным расстоянием $F=25$ см берут из набора линз и зеркал и закрепляют в диске-ширме, прилагаемой к набору. В качестве объективов можно также применить две двояковыпуклые линзы. Обращают внимание учащихся на то, что при наличии полного оптического контакта в месте соприкосновения линзы с пластинкой в отраженном свете наблюдается темное пятно в центре темных концентрических колец. Для объяснения явления можно воспользоваться рисунком 2-68.

Лучи *1*, *2*, отраженные от поверхностей линзы и пластинки, обладая разностью хода $2h$ (на чертеже для ясности лучи изображены не перпендикулярно к пластинке), интерферируют,

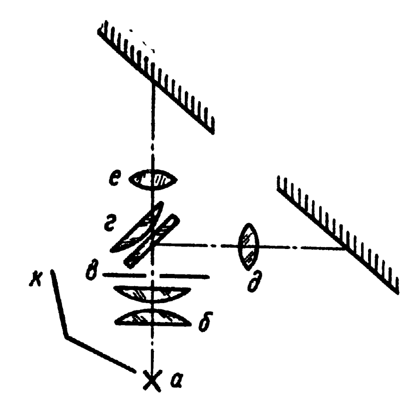
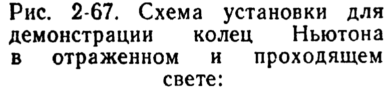


Рис. 2-67. Схема установки для демонстрации колец Ньютона в отраженном и проходящем свете:


а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — прибор «кольца Ньютона; *д* и *е* — объективы; *ж* — экран-ширма.

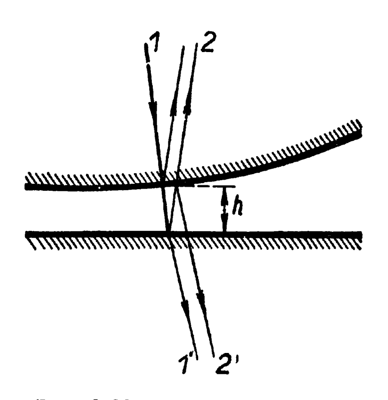


Рис. 2-68. К объяснению колец Ньютона, полученных в отраженном и проходящем свете.

образуя на нижней поверхности линзы картину в виде концентрических колец, соответствующих равной толщине воздушной прослойки.

Кроме того, разность хода лучей *1*, *2* отличается на полволны. Луч *1* отражается от воздуха и не меняет фазы, а луч *2* отражается от стекла (оптически более плотной среды) и теряет полволны. Следовательно, в отраженном свете оптическая разность хода между лучами *1*, *2* составит $2h+\frac{\lambda}{2}$ (для лучей, падающих перпендикулярно к пластинке, и при $n=1$). В проходящем свете наблюдается иная картина: в центре образуется светлое пятно и вокруг концентрические кольца, расположенные на местах, где были ранее темные кольца. Эта инверсия, т. е. смена цветов, объясняется неодинаковыми условиями, вызванными отражением лучей *1*, *2* и преломлением лучей *1'*, *2'*.

Проходящие (преломленные) лучи *1'*, *2'* также имеют разность хода $2h$. Однако в отличие от отраженных лучей преломленные лучи *1'*, *2'* проходят без изменения фазы, т. е. их оптическая разность хода составит $2h$ (для лучей, падающих перпендикулярно к пластинке, и при $n=1$).

Таким образом, рассмотренные случаи соответствуют условиям:

1) места минимумов в отраженном свете: $2h+\frac{\lambda}{2}=m\frac{\lambda}{2}$;

2) места максимумов в проходящем свете: $2h=(m-1)\frac{\lambda}{2}$, где m — нечетное число.

Следует иметь в виду, что в место соприкосновения между линзой и плоской поверхностью стекла могут попасть пылинки и исказить картину интерференции. Поэтому стекла перед опытом надо тщательно протирать.

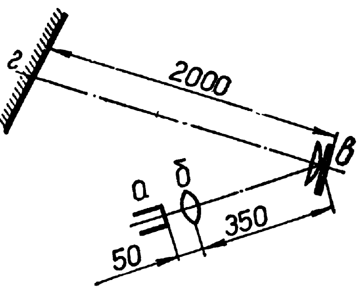


Рис. 2-69. Схема установки с лазером для демонстрации колец Ньютона:

а — лазер ЛГ-209; *б* — линза $F = 17$ мм; *в* — прибор «кольца Ньютона»; *г* — экран.

Эту демонстрацию удобнее проводить в монохроматическом свете, т. е. со светофильтром. Применяя светофильтр, составленный из двух частей (красной и фиолетовой), можно выразительно показать различие в диаметре колец.

Наконец, пользуясь регулировочными винтами, можно показать, как изменение величины воздушного зазора влияет на форму колец.

Схема установки с учебным лазером изображена на рисунке 2-69.

ОПЫТ 85. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с лампой накаливания или дуговой лампой, 2) рамка проволочная для мыльных пленок, 3) экран проекционный, 4) мыльный раствор, 5) фотокювета 9×12 см, 6) лезвие безопасной бритвы, 7) штатив универсальный, 8) лазер учебный ЛГ-209.

На рисунке 2-70 изображена установка, которую собирают для демонстрации явления интерференции с мыльной пленкой.

Сначала перед конденсором располагают проволочную петлю. Ее плотно закрепляют в коротком деревянном стержне диаметром 10 мм и вставляют во втулку рейтера.

Петля должна помещаться на таком расстоянии от осветителя, чтобы сходящийся от конденсора пучок света полностью покрывал ее. Для этого за петлей вплотную к ней помещают небольшой лист белой бумаги, пересекающий световой конус в вертикальной плоскости. Перемещая его вместе с петлей вдоль скамьи, подбирают подходящий размер светового пятна. Затем под петлю подставляют снизу стакан с мыльным раствором, погружают всю петлю в раствор и убирают стакан. На петле образуется ярко освещенная мыльная пленка.

На пути светового пучка, отраженного от мыльной пленки, устанавливают объектив на треноге от универсального штатива. Перемещая объектив вдоль этого пучка, получают на экране четкое изображение мыльной пленки с яркими цветными полосами интерференции.

Это изображение будет обратное. Для получения прямого изображения применяют объектив с плоским зеркалом или с оборотной призмой (см. ч. 1, рис. 5).

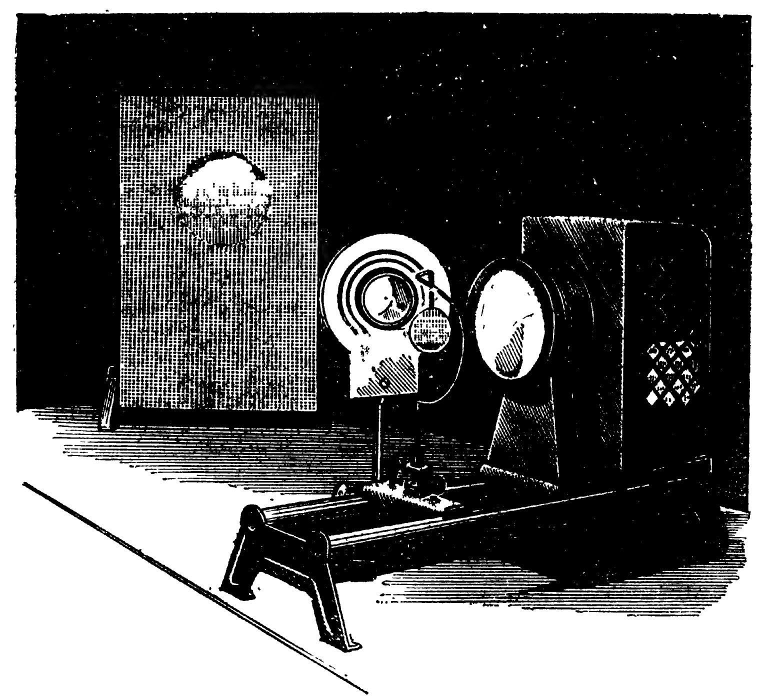


Рис. 2-70. Установка для демонстрации интерференции света в тонких пленках.

Между мыльной пленкой и конденсором помещают оранжевый или красный светофильтр. На экране наблюдают в монохроматическом свете ряд параллельных чередующихся светлых и темных полос. Они располагаются с постепенным уменьшением расстояний книзу вследствие того, что мыльный раствор, стекая под действием силы тяжести, образует вертикальный клин, обращенный острием вверх. Для объяснения наблюдаемого явления воспроизводят на классной доске рисунок 2-71. Световой пучок *1*, идущий от источника, расщепляется на два *1′* и *1″* путем отражения от передней и задней поверхности пленки. Они интерферируют.

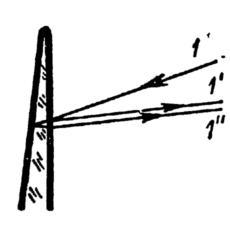


Рис. 2-71. К объяснению интерференции света в тонких пленках.

Как видно из рисунка, пленка в разных местах имеет различную толщину, поэтому, где разность хода достигает четного числа полуволн, оба пучка взаимно усиливают друг друга (максимум). Где разность хода достигает нечетного числа полуволн, наблюдается взаимное ослабление интенсивности (минимум). В результате и на экране в монохроматическом свете будут наблюдаться чередующиеся светлые и темные полосы.

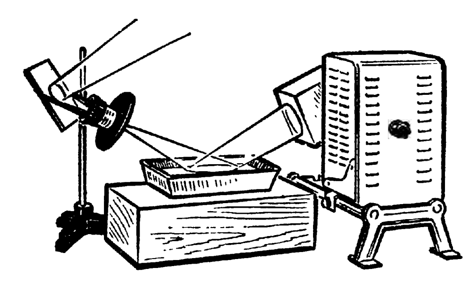


Рис. 2-72. Установка для демонстрации интерференции света в тонких пленках на воде.

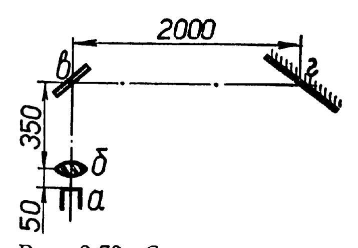


Рис. 2-73. Схема установки с лазером для демонстрации интерференции света в тонких пленках:

а — лазер ЛГ-209; *б* — линза $F=17$ мм; *в* — тонкая пленка; *г* — экран.

Чтобы опыт продолжался достаточное время, важно иметь довольно прочную мыльную пленку. С этой целью можно рекомендовать следующий состав мыльной жидкости: олеиново-кислый натрий (или калий) — 2,5 г; глицерин — 1,0 г; вода — 97,5 г (лучше дистиллированная при 60° С). Мыльную жидкость следует хранить в темном сосуде [1].

Явление интерференции света можно также показать в тонких пленках, образованных на поверхности воды при растекании, например, керосина, масла или в прозрачной пленке оксида на полированной стальной пластинке при ее нагревании.

Установку собирают по рисунку 2-72. Из корпуса конденсора вынимают переднюю линзу. На ту часть цилиндрического корпуса конденсора, где помещалась линза, плотно надевают приспособление для горизонтальной проекции, которое будет теперь служить для освещения поверхности воды. При этом обращают внимание на то, чтобы выступы на корпусе приспособления совпадали с вырезами на корпусе конденсора. Так как эти вырезы и выступы расположены точно под углом 120°, то, поворачивая приспособление, располагают плоскость передней линзы с наклоном к поверхности стола.

Затем на какую-либо подставку устанавливают фотографическую кювету с водой. Отраженный от ее поверхности наклонный пучок света, выходящий из конденсора, должен проходить через объектив. Для этого объектив с плоским отражающим зеркалом укрепляют при помощи штатива. На экране получается светлое, равномерно освещенное пятно. Перемещая теперь объектив относительно его оправы, можно получить резкое изображение поверхности воды [2]. Затем вводят на поверхность воды

[1] Хорошую, прочную пленку можно изготовить из лака для ногтей. На поверхность воды с помощью глазной пипетки вводят каплю лака; когда он растечется и застынет, снизу поддевают проволочную петлю. Пленка прочно прилипает к проволоке и долго сохраняется на ней.

[2] Для этого на поверхность воды можно положить, например, спичку.

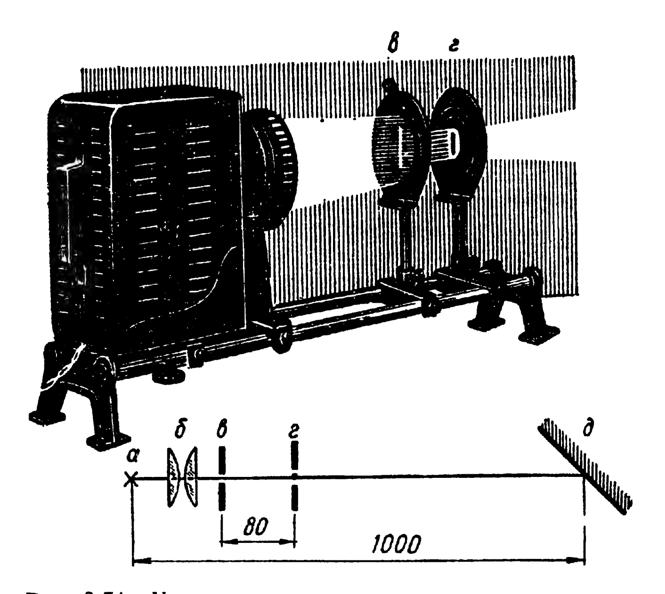


Рис. 2-74. Установка и схема для демонстрации дифракции света от нити:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — щель; *г* — нить на рамке; *д* — экран.

каплю лака, масла или керосина и наблюдают на экране явление интерференции в виде яркой разноцветной мозаики.

Не нарушая установки аппарата, можно получить на экране цветные полосы на прозрачной пленке оксида металла, например на полированной стальной пластинке (лезвие безопасной бритвы) при ее нагревании. Для этого лезвие бритвы укрепляют в лапке штатива в той же плоскости, где была расположена поверхность воды в кювете, а снизу лезвие нагревают пламенем спички [1].

Схема установки с учебным лазером изображена на рисунке 2-73.

ОПЫТ 86. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА ОТ ТОНКОЙ НИТИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с лампой накаливания или дуговой лампой, 2) щель раздвижная, 3) диски-ширмы — 2 шт., 4) нить на рамке, 5) экран проекционный обычный или полупрозрачный, 6) лазер учебный ЛГ-209, 7) линза $F=17$ мм.

Собирают установку по рисунку 2-74, где изображены общий вид и схема с указанием расстояний между отдельными деталями. Существенными частями установки, влияющими на качество опыта, являются раздвижная щель и нить.

[1] Так же на экране можно получить полосы интерференции, образующиеся на поверхности асфальта, смоченного капелькой масла.

Щель перед опытом должна быть тщательно очищена от пыли сухой кисточкой или мягкой полотняной тканью. При этом следует обратить внимание, чтобы на краях щели не остались мелкие ворсинки от ткани или волосы от кисти. Нить или проволоку диаметром 0,1—0,05 мм натягивают на рамку из набора или на картонную рамку размером диапозитива и концы нити приклеивают к рамке любым клеем.

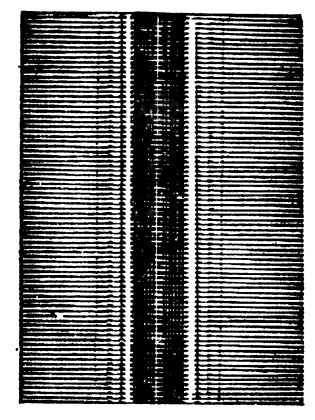


Рис. 2-75. Дифракционные полосы от тонкой нити.

Закончив сборку установки по указанному выше рисунку, сначала без нити получают на экране резкое изображение щели с равномерным освещением по всему ее полю. С этой целью перемещают источник света, конденсор и щель так, чтобы «ребро» нити лампы было расположено параллельно щели и находилось с ней на оптической оси конденсора.

Затем перед щелью на оптической оси конденсора устанавливают нить на рамке, соблюдая при этом параллельное расположение нити и щели. Медленно суживают щель и получают на экране полосы дифракционного спектра [1].

При повороте экрана на 40—45° изображение «растягивается». На рисунке 2-75 изображен вид дифракционного спектра, представляющего собой светлую полосу в средней части и чередующиеся темные и светлые полосы справа и слева от нее. Учащиеся наблюдают явление, подходя к экрану небольшими группами по 4—5 человек. Этот рисунок и рисунок 2-76 учитель воспроизводит на классной доске и обращает внимание на важный факт наличия в средней части спектра светлой полосы. Она образуется в результате огибания препятствия и интерференции двух когерентных систем световых волн, пути этих волн r_1 и r_2 одинаковы и волны приходят в направлении O с одинаковой фазой. Наличие темных полос в направлении A и A_1 и светлых по-

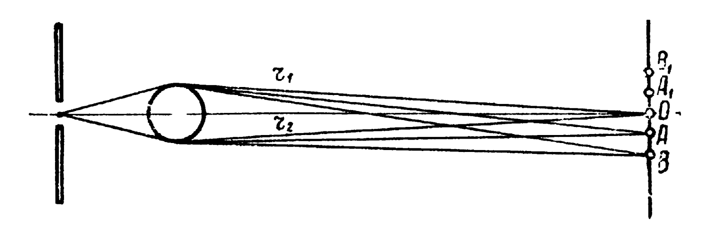


Рис. 2-76. К объяснению явления дифракции от нити.

[1] На полупрозрачном экране дифракционный спектр наблюдают «на просвет».

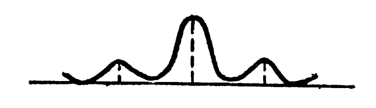


Рис. 2-77. График яркости полос дифракции, полученных от нити.

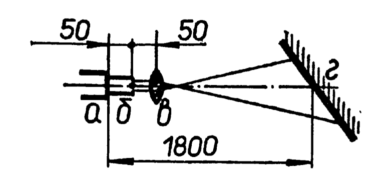


Рис. 2-78. Схема установки с лазером для демонстрации дифракции света от нити:
а — лазер ЛГ-209; *б* — нить на рамке; *в* — линза $F=17$ мм; *г* — экран.

лос в направлении B и B_1 объясняется соответствующей разностью хода световых волн. В первом случае разность хода составляет четное, а во втором — нечетное число полуволн. Полезно обратить внимание учащихся на график распределения яркости полос дифракционного спектра (рис. 2-77) и трудность наблюдения полос дифракции после второго минимума.

Схема установки с учебным лазером изображена на рисунке 2-78.

ОПЫТ 87. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА ОТ УЗКОЙ ЩЕЛИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с лампой накаливания или дуговой лампой, 2) щели раздвижные — 2 шт., 3) диски-ширмы — 2 шт., 4) экран проекционный обычный или полупрозрачный, 5) лазер учебный ЛГ-209, 6) линза $F=-263$ мм из набора линз и зеркал.

Схема установки для этого опыта представлена на рисунке 2-79, где указаны расстояния между отдельными деталями.

Подготовка к демонстрации начинается с установки источника света. Лампу накаливания располагают так, чтобы ее спирали оказались на оптической оси конденсора и были обращены «ребром» к нему. Затем в пучке светового конуса от конденсора перемещают щель и закрепляют ее на скамье в таком месте, где сечение светового конуса полностью покрывает щель. Щель должна быть расположена параллельно спиралям лампы и раз-

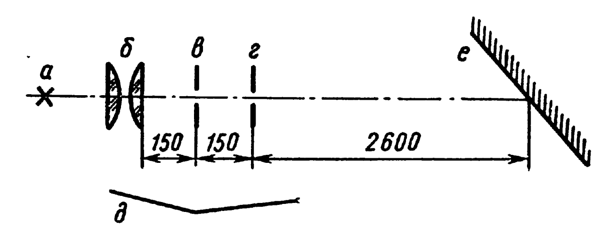


Рис. 2-79. Схема установки для демонстрации дифракции от щели:
а — источник света; *б* — конденсор; *в* и *г* — щели; *д* — ширма; *е* — экран.

двинута при помощи винта настолько, чтобы просвет между «ножами» составлял приблизительно 0,2 мм.

После этого устанавливают вторую щель; она должна располагаться на оптической оси конденсора и быть строго параллельной первой. Для этого сначала вторую щель придвигают вплотную к первой и, осторожно вращая подвижную часть диска ширмы, обеспечивают параллельность. Затем вторую щель отодвигают от первой на расстояние 150 мм и закрепляют на скамье. Этим заканчивается подготовка установки.

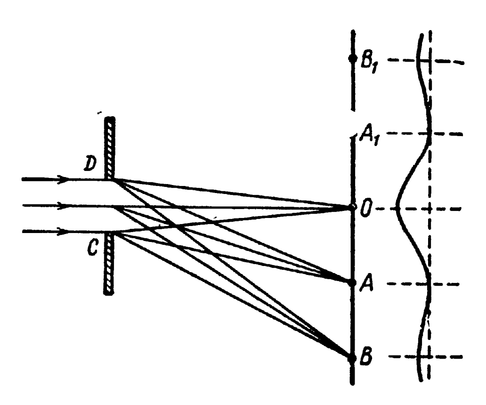


Рис. 2-80. К объяснению явления дифракции от щели.

Осторожно вращая винт второй раздвижной щели, медленно уменьшают просвет между ее «ножами» и наблюдают за дифракционной картиной. Сначала на экране получается светлая полоса с размытыми краями. При дальнейшем сужении второй щели ширина светлой полосы и ее освещенность уменьшаются, появляется дифракционная картина [1]. Если линии дифракции оказываются недостаточно резкими, надо осторожно повернуть на малый угол одну щель относительно другой, чтобы добиться более точной установки щелей на параллельность.

Кратко поясняют учащимся сущность опыта по рисунку 2-80, где показана схема образования полос дифракции и график их яркости. На щель *DC* падает плоская волна. Свет от каждой точки, расположенной внутри щели, распространяется по разным направлениям.

Очевидно, волны в направлении *O* распространяются в одинаковой фазе и усиливают друг друга, образуя яркую полосу. Она проходит от наблюдателя через точку *O* перпендикулярно к плоскости чертежа и лежит на продолжении оптической оси конденсора.

Эта яркая полоса носит название центрального максимума. Применяя далее метод Гюйгенса — Френеля, можно объяснить также образование соответствующих максимумов B, B_1 и т. д., расположенных симметрично от центрального максимума.

Если постепенно изменять величину просвета второй щели, то можно заметить, как на экране в середине светлой полосы появляется полоса темная (в просвет щели укладывается четное число зон Френеля), а затем она исчезает (укладывается нечетное

---

[1] На полупрозрачном экране дифракционную картину наблюдают «на просвет».

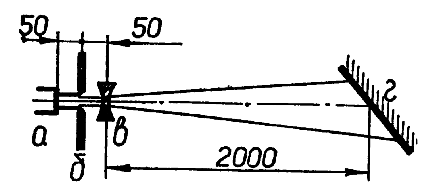


Рис. 2-81. Схема установки с лазером для демонстрации дифракции света от щели:

а — лазер ЛГ-209; *б* — щель; *в* — линза F=—263 мм; *г* — экран.

число зон). Этот результат можно получить другим приемом. Не изменяя ширину второй щели, медленно перемещают ее относительно первой, следя за тем, чтобы не нарушалась резкость изображения на экране.

Схема установки с учебным лазером изображена на рисунке 2-81.

ОПЫТ 88. ПОЛУЧЕНИЕ СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) щель раздвижная, 3) решетка дифракционная со 100 штрихами на 1 мм, 4) светофильтр, 5) экран проекционный, 6) лазер учебный ЛГ-209.

Опыт с дифракционной решеткой позволяет ознакомить учащихся с дифракционным спектром и одним из приближенных методов определения длины световой волны. Схема установки для такой демонстрации представлена на рисунке 2-82.

Подготовку к опыту начинают с общеизвестной установки источника света в осветителе проекционного аппарата. Затем определяют место раздвижной щели на оптической скамье. Для этого перемещают щель в конусе лучей света от конденсора и, когда она окажется полностью освещенной, ее закрепляют. Ставят перед щелью объектив и получают ее резкое изображение на экране. Ширина щели должна быть 2—3 мм.

Перед объективом устанавливают диапозитивную рамку, в которую вставляют решетку так, чтобы ее штрихи были параллельны щели. На экране получают дифракционную картину, состоящую из белой полосы в середине (центральный максимум) и ряда спектров, симметрично расположенных справа и слева от нее. По мере удаления от центра спектры становятся более широкими и менее яркими. Эти спектры носят названия спектров первого, второго, третьего и т. д. порядков (рис. 2-83).

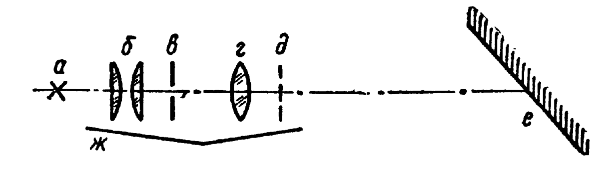


Рис. 2-82. Схема установки для демонстрации дифракционного спектра:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — объектив; *д* — дифракционная решетка; *е* — экран; *ж* — ширма.

Спектры всех порядков начинаются с фиолетовой полосы, за которой следуют все другие цвета с постепенным возрастанием длины световой волны, и заканчиваются красной полосой, причем фиолетовые полосы всех спектров расположены ближе к центральному максимуму.



Рис. 2-83. Взаимное расположение дифракционных спектров.

В дифракционном спектре расстояния цветных полос от центрального максимума пропорциональны длинам волн. Поэтому определение длины световой волны с помощью решетки является наиболее удобным. На эту тему может быть поставлена следующая экспериментальная задача.

Получают на экране дифракционную картину в монохроматическом свете, применяя, например, красный светофильтр. Затем вычерчивают на классной доске схему установки опыта, изображенную на рисунке 2-84. Слева показана дифракционная решетка, а справа на экране отмечена область M, куда проецируется одна из полос. Предлагается определить длину световой волны.

Образование световой полосы в указанном месте удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{\Delta}{a+b}=\frac{d}{D}.$$

Но для любого максимума $\Delta = 2n\frac{\lambda}{2}$, поэтому

$$\frac{n\lambda}{a+b}=\frac{d}{D},$$

откуда

$$\lambda=\frac{d\,(a+b)}{Dn}.$$

Здесь $(a+b)$ — период дифракционной решетки, n — порядок спектра, $d=OM$ — расстояние от центрального максимума до светлой полосы M, наконец, $D=aM$ — расстояние от дифракционной решетки до светлой полосы. Величины D и d можно измерить.

Полезно показать на экране спектр от другой решетки, имеющей большее или меньшее число штрихов на миллиметре.

Следует также получить микропроекцию штрихов дифракционной решетки. С этой целью надо воспользоваться схемой, изо-

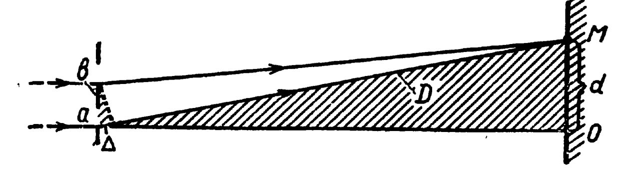


Рис. 2-84. К задаче на определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки.

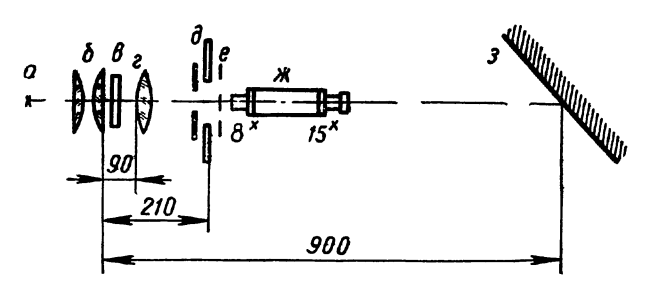


Рис. 2-85. Схема установки для микропроекции с микроскопом:
а — источник света; *б* — конденсор; *в* — теплопоглощающий фильтр; *г* — линза; *д* — диафрагма; *е* — дифракционная решетка; *ж* — микроскоп; *з* — экран.

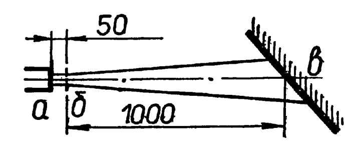


Рис. 2-86. Схема установки с лазером для демонстрации дифракции от решетки:
а — лазер ЛГ-209; *б* — дифракционная решетка; *в* — экран.

браженной на рисунке 2-85, и собрать установку с биологическим микроскопом (см. ч. 1, опыт 93).

В заключение целесообразно получить дифракционную картину от двумерной решетки.

Лучше эти опыты получаются с учебным лазером ЛГ-209 (рис. 2-86).

ОПЫТ 89. ДИФРАКЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА МЕЛКИМИ ЧАСТИЦАМИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) диафрагма дисковая с круглыми отверстиями, 3) ванночка плоскопараллельная размером 8×8×8 см, 4) столик подъемный, 5) экран проекционный, 6) раствор гипосульфита и соляной кислоты.

В метеорологической оптике рассматриваются разнообразные явления, связанные с дифракционным рассеянием света частицами, плавающими в воздухе (мельчайшие капельки воды — туман или дым, пыль, кристаллы льда и т. д.).

Установку для демонстрации подобного опыта собирают по схеме, представленной на рисунке 2-87. В ванночку с сильно раз-

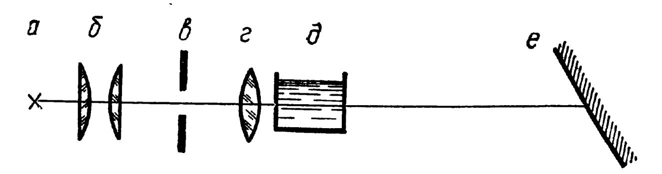


Рис. 2-87. Схема установки для демонстрации дифракционного рассеяния света мелкими частицами:
а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — объектив; *д* — плоскопараллельная ванна; *е* — экран.

бавленным раствором гипосульфита добавляют соляную кислоту. Через несколько минут из раствора осаждается сера. Мельчайшие частицы серы в начале опыта рассеивают главным образом пучки света с короткой длиной волны, т. е. голубые и синие. Поэтому раствор в ванне оказывается синим, а проходящие сквозь него пучки света — желтыми (цвет, дополнительный синему). По мере роста частиц серы начинают рассеиваться другие пучки света с более длинной волной, поэтому через ванну на экран будет проходить свет не желтый, а оранжевый, затем красный.

90. КИНОФИЛЬМ «ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА»

Оборудование: 1) кинофильм «Волновые свойства света»[1], 2) кинопроектор, 3) экран проекционный.

Кинофильм состоит из краткого введения и двух фрагментов. Во введении показано несколько примеров интерференции и дифракции света.

В первом фрагменте — «Интерференция света» — на основе опыта с бипризмой Френеля объясняется возникновение интерференционной картины, вводится понятие разности хода и формулируются условия максимума и минимума колебаний при интерференции. Затем показывается опыт с «кольцами Ньютона». Заканчивается фрагмент рассмотрением явления интерференции для проверки полировки линз и просветления оптики. Второй фрагмент — «Дифракция света» — начинается с показа дифракционных изображений храпового колеса и иглы. Затем рассказывается о работах В. К. Аркадьева по наблюдению дифракции света на крупных предметах. Далее показывается устройство дифракционной решетки, ее спектр, приводится сравнение его с дисперсионным спектром.

В конце кинофильма сообщается о значении явлений интерференции и дифракции света.

Кинофильм на уроках может быть показан не полностью, а в виде отдельных фрагментов при объяснении нового материала.

Особое внимание учащихся следует обратить на практическое применение явления интерференции для проверки полировки линз и просветленной оптики.

Наиболее важной частью второго фрагмента — «Дифракция света» — является объяснение явления дифракции света от дифракционной решетки на основе принципа Гюйгенса — Френеля. Этот вопрос учитель должен повторить с учащимися до показа кинофильма. При просмотре второго фрагмента следует обра-

---

[1] Волновые свойства света. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1967, 2 ч. (2 фрагм.), цветной. Продолжительность демонстрации — 20 мин.

тить внимание учащихся на уникальные фотографии, выполненные В. К. Аркадьевым в опытах по наблюдению дифракции света на крупных предметах.

ОПЫТ 91. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ПОЛЯРОИДАМИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) два поляроида из набора по поляризации света, 3) фильтр инфракрасный теплопоглощающий, 4) экран проекционный.

Перед сборкой установки укрепляют поляроиды на ширмах-дисках, прилагаемых к набору по дифракции и интерференции света. К поворотным кольцам каждого из дисков приклеивают вырезанные из белого картона хорошо заметные издали стрелки-указатели так, чтобы при скрещенных поляроидах стрелки располагались перпендикулярно друг другу.

Затем берут прилагаемый к проекционному аппарату теплопоглощающий фильтр, который во время опыта предохранял бы поляроидную пленку от случайного перегревания свыше 60° С.

Сборку установки на скамье проекционного аппарата начинают с расположения фильтра перед конденсором осветителя. Затем включают лампу и в образовавшемся световом конусе от конденсора (но не в фокусе) укрепляют поляроид. С помощью объектива проецируют освещенную часть поляроида на экран в виде достаточно яркого круга.

Заметив положение стрелки у поляроида, поворачивают его сначала на 90°, потом на 180, 270, 360°. Обращают внимание учащихся, что при этом никаких изменений на экране не происходит. Опыт повторяют, но со вторым поляроидом.

Далее собирают установку с двумя нескрещенными поляроидами, когда стрелки-указатели лежат в одной плоскости

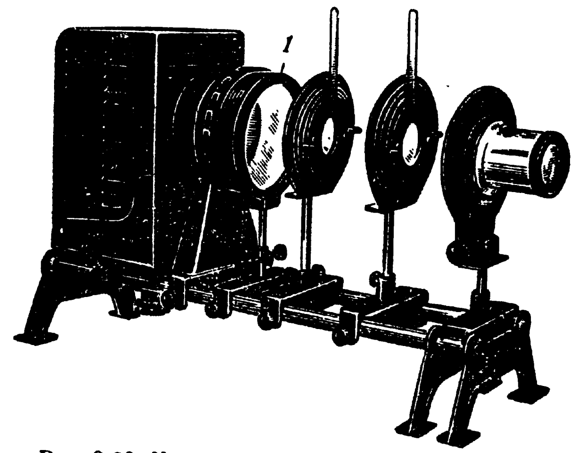


Рис. 2-88 Установка с двумя поляроидами.
1 — теплопоглощающий фильтр.

(рис. 2-88). При этом поляроиды лучше расположить ближе к конденсору, чтобы фокус светового пучка, выходящего из конденсора, оказался за вторым поляроидом. С помощью объектива снова проецируют на экран освещенную часть второго поляроида и медленно поворачивают его на 90° относительно первого. Учащиеся замечают постепенное уменьшение освещенности круга на экране до максимального гашения. Дальнейшие повороты на 180, 270 и 360° приводят соответственно к просветлению, гашению и снова к просветлению круга на экране.

Из опыта учащиеся легко приходят к выводу о перпендикулярности колебаний в световом пучке по отношению к направлению его распространения. Очевидно, первый поляроид служит в опыте поляризатором, а второй — анализатором.

Повторяют последний опыт, поменяв местами поляроиды. Убеждаются, что каждый из них может служить как поляризатором, так и анализатором.

Следует иметь в виду, что в описанной установке, а также в опытах 92, 93 можно не применять теплопоглощающий фильтр, если воспользоваться узким пучком параллельных лучей. Для этого надо из конденсора проекционного аппарата вынуть одну линзу и перед однолинзовым конденсором поместить диафрагму диаметром 10 мм.

ОПЫТ 92. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) зеркало черное и поляроид из набора по поляризации света, 3) два зеркала на штативе, 4) штатив универсальный, 5) экран переносный, 6) фотокювета с водой, 7) осветитель для теневого проецирования и подсвета.

Основная цель опыта состоит в том, чтобы расширить представления учащихся о явлении поляризации света; показать экспериментально, что свет поляризуется не только при прохождении через поляроиды, как показано в предыдущем опыте, но и при отражении от поверхности различных веществ.

Установку для опыта собирают на оптической скамье по схеме, показанной на рисунке 2-89. Здесь поляризатором света служит черное зеркало *г*, а анализатором — поляроид *д*. Зеркало закрепляют вертикально на ширме-диске, установленной в рейтере скамьи, и поворачивают к главной оптической оси конденсора приблизительно под углом 60°. На пути отраженного пучка света помещают объектив. Его устанавливают на выдвижной части скамьи, расположенной по ходу пучка отраженных лучей. Объектив перемещают вдоль пучка и получают на экране светлое круглое пятно — изображение диафрагмы *в*.

За объективом или перед ним располагают поляроид, закрепленный также на ширме-диске и установленный в рейтере. Медленно поворачивают поляроид вокруг горизонтальной оси. На экране будет ясно видно постепенное затемнение и просветление

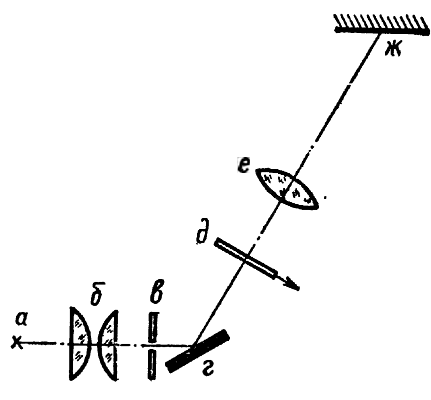


Рис. 2-89. Схема установки для демонстрации поляризации света при отражении:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — черное зеркало; *д* — поляроид; *е* — объектив; *ж* — экран.

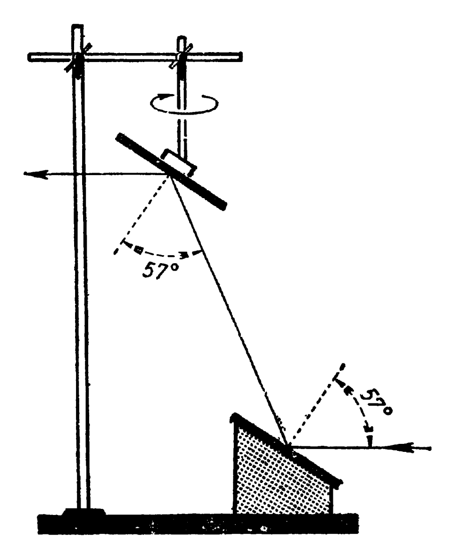


Рис. 2-90. Два зеркала на штативе для демонстрации поляризации света при отражении.

пятна. Следовательно, пучок света, отраженный от зеркала, оказывается поляризованным.

После этого поворачивают зеркало так, чтобы угол падения пучка света сначала стал 45°, а затем 75°, и каждый раз, переставляя переносный экран, повторяют описанный выше опыт. Из наблюдений на экране убеждаются, что степень поляризации света в значительной мере зависит от величины угла отражения.

Наибольшая поляризация наступает приблизительно при 60°. При углах же, больших или меньших 60°, свет поляризуется лишь частично.

С помощью осветителя для теневого проецирования получают на экране или потолке «зайчик» при отражении пучка света от поверхности воды. В отраженный пучок помещают поляроид на ширме-диске и, держа его в одной руке, другой медленно поворачивают на 360°. По затемнению и просветлению «зайчика» убеждаются в поляризации света, отраженного от поверхности воды.

Поляризацию света при отражении можно с меньшими удобствами продемонстрировать и без поляроида на простой установке с самодельными деталями (рис. 2-90). На основание штатива ставят небольшое стеклянное черное зеркало, закрепленное под углом 33° к горизонту. Вверху располагают второе такое же зеркало, зажатое в лапки штатива. Направляют от проекционного аппарата на нижнее зеркало параллельный пучок света (угол падения 57°). Верхнее же зеркало располагают так, чтобы пучок попал на него также под углом 57° и, отразившись, оказался на экране.

Поворачивают несколько раз верхнее зеркало на небольшие углы вокруг вертикальной оси и принимают изображения на переносный экран. Убеждаются, что свет хорошо отражается, когда зеркала расположены параллельно, и почти полностью гасится, когда они скрещены.

Таким образом экспериментально убеждаются, что зеркала при отражении поляризуют свет и могут служить как поляризаторами, так и анализаторами.

ОПЫТ 93. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ПРИ ПРЕЛОМЛЕНИИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) стопка стеклянных пластинок в оправе, 3) поляроид, 4) экран проекционный.

Свет, падающий на стеклянную пластинку под углом полной поляризации (57°), отражается от ее поверхности, частично преломляется и проходит сквозь пластинку. При этом поляризованным оказывается не только отраженный пучок света, как это демонстрировалось в предыдущем опыте, но и преломленный.

Однако при преломлении всегда поляризуется лишь незначительная часть света (несколько процентов), поэтому обнаружить это явление в демонстрационном опыте затруднительно. Но степень поляризации можно значительно увеличить, если многократно повторить явление преломления, т. е. пропустить свет через несколько лежащих друг на друге стеклянных пластинок. В такой стопке из 15—20 пластинок каждое новое преломление увеличивает поляризацию и ее можно наглядно обнаружить с помощью поляроида.

Для демонстрации опыта собирают простую установку на скамье проекционного аппарата. Перед конденсором осветителя располагают при помощи рейтеров диафрагму и за ней — диск-ширму со стопкой пластинок. Отверстие диафрагмы подбирают так, чтобы через стопку проходил максимум света. За стопкой устанавливают объектив, а затем — поляроид (рис. 2-91). Перемещая объектив вдоль скамьи, проецируют на экран диафрагму *в* и наблюдают на нем сравнительно светлое пятно (угол поворота поляроида подбирают заранее).

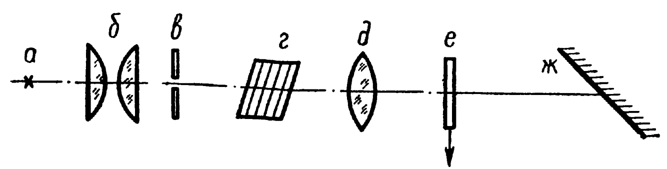


Рис. 2-91. Схема установки для демонстрации поляризации света при преломлении:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — диафрагма; *г* — стопка пластин; *д* — объектив; *е* — поляроид; *ж* — экран.

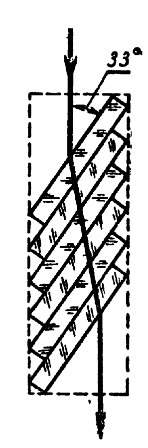


Рис. 2-92. Стопка стеклянных пластин в оправе.

Медленно вращают поляроид вокруг главной оси конденсора (делают полный оборот) и обнаруживают, что освещенность пятна на экране постепенно изменяется: за один оборот свет дважды появляется и дважды гаснет. Таким образом, стопка пластинок является типичным поляризатором и обладает такими же свойствами, как и поляроидная пленка. Очевидно, стопка может служить и анализатором, если ее поместить впереди поляроида и медленно вращать в диске-ширме.

Следует обратить внимание, что стопка собрана в оправе так, чтобы отражающая поверхность пластинок была наклонена к главной оптической оси конденсора под углом 33°, когда оправа расположена перпендикулярно к ней (рис. 2-92). Оказывается, в этом случае согласно закону Брюстера ($n = \text{tg}\varphi$) угол преломления в стекле будет 54°31′, т. е. это будет угол максимальной поляризации [1]. Если в стопке пластинки стекла расположить под другим углом, то при прочих равных условиях степень поляризации света будет меньшей.

ОПЫТ 94. ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА РАСТВОРОМ САХАРА

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) фильтр инфракрасный теплопоглощающий, 3) два поляроида, 4) кювета для проецирования, 5) насыщенный раствор сахара, 6) экран проекционный.

Собирают установку по рисунку 2-88 и проецируют второй поляроид (кольца его оправы) на экран. Затем поляроиды скрещивают, чтобы на экране получилось затемненное поле. Обращают внимание учащихся на почти прямой угол, образованный в этом случае стрелками, укрепленными на дисках-ширмах.

Между поляроидами устанавливают на подъемном столике кювету, наливают в нее 40—50-процентный раствор сахара до уровня, который делил бы видимое поле пополам, и производят дополнительную фокусировку. При этом наблюдают на экране хорошо заметное просветление одной половины поля по сравнению с другой.

Очевидно, раствор сахара изменил (повернул) плоскость поляризации света, прошедшего поляризатор, поэтому часть лучей из общего потока стала проходить анализатор и попадать на экран. Чтобы восстановить прежнюю картину — получить затем-

[1] Точное значение угла зависит от показателя преломления; обычно применяется стекло с коэффициентом преломления $n = 1{,}5$.

ненное поле, поворачивают один из поляроидов и обнаруживают, что угол между ними стал заметно меньше прямого.

Не изменяя установки (поле на экране затемненное), подливают в кювету насыщенный раствор сахара и снова наблюдают просветление поля. Убеждаются, что для получения затемнения приходится еще больше поворачивать анализатор, уменьшая угол между поляроидами.

Таким образом экспериментально устанавливают зависимость между концентрацией раствора и углом поворота анализатора. Иначе говоря, раскрывают принцип действия распространенного в науке и технике прибора — сахариметра.

При введении раствора сахара между поляроидами на экране образуется не только просветление, но и некоторое слабое окрашивание поля. При повороте анализатора окрашивание немного меняется. Чтобы избежать этого явления и восстановить потемнение, рекомендуется опыт проводить в монохроматическом свете, поставив на пути пучка света светофильтр. Лучше других подходит желтый или светло-оранжевый светофильтр.

Раствор сахара перед опытом рекомендуется тщательно профильтровать. Для хранения его переливают в колбу, прибавляют несколько капель формалина и плотно закрывают пробкой.

ОПЫТ 95. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) фильтр инфракрасный теплопоглощающий, 3) два поляроида, 4) пресс винтовой с моделью рельса, 5) пластинка для демонстрации изгиба, 6) пластинка оконного стекла, 7) спиртовка, 8) отрезок проволоки диаметром 2,5—3 мм, 9) экран проекционный, 10) кинофильм «Поляризация света», 11) кинопроектор.

Для этого опыта установку собирают по рисунку 2-88. Между поляроидами помещают небольшую пластинку оконного стекла, зажатого в лапку штатива. С помощью объектива проецируют пластинку на экран, для чего на ней делают какую-либо небольшую метку.

Затем скрещивают поляроиды, чтобы получить на экране почти полное затемнение. Нагревают на спиртовке или газовой горелке докрасна конец проволоки и прикасаются им к поверхности пластинки. При таком неравномерном нагревании в ней возникают натяжения. Стекло теряет свою изотропность, становится двупреломляющим, и на экране появляется картина, показанная на рисунке 2-93.

Так как подобные натяжения возникают в стекле и при механическом воздействии, то можно описанным способом исследовать распределение напряжений в моделях различной конфигурации при сжатии или растяжении.

С этой целью вместо пластинки между поляроидами помещают на рейтере модель рельса из органического стекла, вставлен-

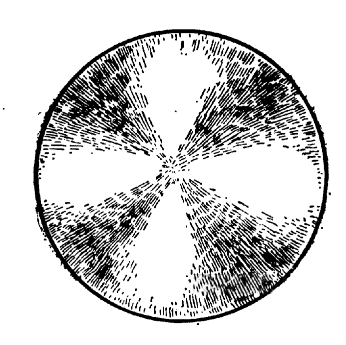


Рис. 2-93. Натяжения в стекле при неравномерном нагревании.

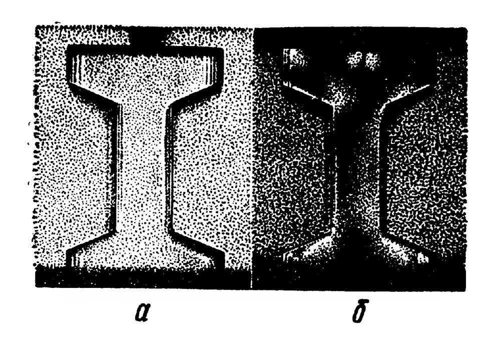


Рис. 2-94. Сжатое стекло (модель рельса) в поляризованном свете:

а — при параллельных; *б* — при скрещенных поляроидах.

ную в винтовой пресс. На экран сначала проецируют изображение модели при нескрещенных поляроидах (рис. 2-94, *а*). Затем поляроиды скрещивают, а модель сжимают, вращая от руки головку винта. Тогда на экране появляется картина распределения напряжений в модели (рис. 2-94, *б*). Постепенно ослабляют винт пресса и обращают внимание, что картина в поляризованном свете исчезает, и поле на экране снова становится затемненным.

Таким же приемом показывают распределение напряжения в изогнутой пластинке. Для удобства демонстрации пластинку с помощью «ушек» закрепляют на оправе винтового пресса, сняв с него предварительно модель рельса. При скрещенных поляроидах сжимают пластинку двумя пальцами за ручки и на экране обнаруживают просветление у ее верхней и нижней кромок и темную полосу посередине, соответствующую зоне отсутствия напряжений.

После изучения поляризации полезно показать учащимся кинофильм «Поляризация света» [1].

В первом фрагменте показаны поперечные механические волны и возможность их поляризации. Рассматривается роль поляризатора и анализатора.

Во втором фрагменте показаны различные поляризаторы и анализаторы света и демонстрируется двойное лучепреломление света в кристалле.

Третий фрагмент посвящен различным применениям поляризованного света, в том числе исследованию механических напряжений в деформированных телах.

[1] Поляризация света. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1972, 2 ч. (3 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 18 мин.

§ 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

96. КИНОФИЛЬМ «ЧТО ТАКОЕ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ»

Оборудование: 1) кинофильм «Что такое теория относительности»[1], 2) кинопроектор, 3) экран проекционный.

Этот кинофильм демонстрируют после изучения основных положений теории относительности с целью повторения учебного материала.

Фильм не имеет фрагментного деления. В нем в популярной форме (в форме беседы между ученым физиком и группой артистов в купе идущего поезда) раскрываются следующие положения:

1. Всякое равномерное прямолинейное движение относительно. Приводится пример: мы движемся относительно станции, но и станция движется относительно нас. Все инерциальные системы отсчета равноправны. Все процессы природы протекают одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

2. Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника света. В фильме рассматривается такой пример: один фонарь находится на платформе, а другой движется вместе с поездом. Свет от обоих фонарей приходит одновременно в данную точку пространства.

3. Одновременность пространственно разделенных событий относительна. События, одновременные в одной системе отсчета, неодновременны в другой. В разных системах отсчета время течет различно. Промежутки времени не являются абсолютными, а зависят от скорости движения системы отсчета.

4. Длина тел относительна. Она зависит от скорости движения тела относительно данной системы отсчета. В различных системах отсчета длина тел различна.

5. Ускорение движения тела абсолютно. Ускорение не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

§ 4. ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

ОПЫТ 97. ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) осветитель ультрафиолетовый, 3) набор по флюоресценции, 4) набор по фосфоресценции, 5) экран флюоресцирующий, 6) набор спектральных трубок (с неоном, гелием, водородом), 7) прибор для демонстрации устройства и действия электроннолучевой трубки, 8) преобразователь высоковольтный «Разряд-1» или машина электрофорная, 9) кювета прямоугольная для проецирования и стакан высокий на

---

[1] Что такое теория относительности. Московская киностудия научно-популярных фильмов, 1968, 2 ч. Продолжительность демонстрации — 20 мин.

200 мл, 10) раствор флюоресцина, 11) спиртовой раствор канифоли, 12) призма прямого зрения, 13) светофильтры, 14) экран настольный.

Явление люминесценции газов, жидкостей и твердых тел рекомендуется демонстрировать в затемненном классе при различных воздействиях на вещество: при освещении, электрическом разряде, бомбардировке электронным пучком и т. п.

1. Электролюминесценцию газов и твердых тел демонстрируют с помощью газонаполненных спектральных трубок и вакуумной электроннолучевой трубки с люминесцирующим экраном.

Спектральные трубки питают от высоковольтного преобразователя или электрофорной машины, присоединяя к их кондукторам трубки с помощью гибких проводников. При наблюдении обращают внимание учащихся на свечение, характерное для каждого газа и твердого вещества.

Возбуждать кратковременное свечение газов можно с помощью наэлектризованной палочки. При приближении сильно наэлектризованной палочки к газонаполненной трубке (с водородом, гелием, неоном) возникает довольно яркая вспышка света.

2. Для демонстрации фотолюминесценции жидкостей собирают установку с проекционным аппаратом (рис. 2-95). Между конденсором и объективом помещают ширму с двойной рамкой для диапозитивов. Перед объективом на подъемном столике ставят прямоугольную кювету из органического стекла и в нее наливают дистиллированную воду.

Обращают внимание учащихся на то, что пучок света в воде при рассматривании его сбоку почти невидим, так как в воде нет частиц, рассеивающих свет. Затем в воду вводят несколько капель раствора канифоли в спирте. Теперь световой пучок в воде становится видимым: частицы канифоли рассеивают свет.

Далее перекрывают световой пучок, падающий на кювету, различными светофильтрами. При этом цвет рассеянного света совпадает с цветом светофильтров. Значит, частицы канифоли

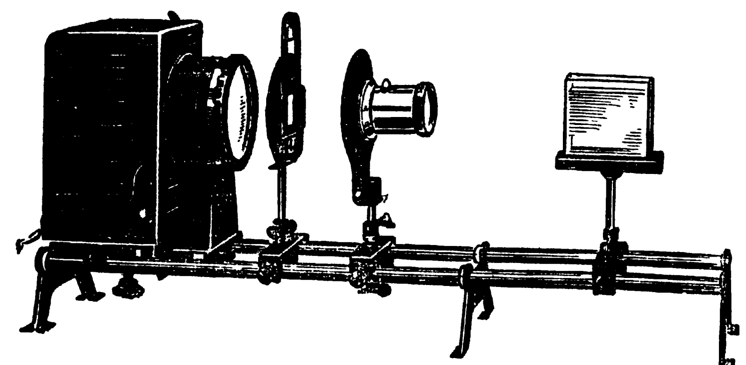


Рис. 2-95. Демонстрация фотолюминесценции жидкости.

рассеивают те лучи, которые на них падают. Наблюдаемое явление представляет собой обычное отражение света.

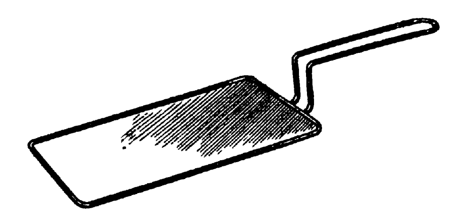


Рис. 2-96. Экран флюоресцирующий.

Снова в кювету наливают чистую дистиллированную воду, в которую добавляют несколько капель раствора флюоресцина. По мере того как флюоресцин тонкими неровными струйками распространяется в воде, учащиеся наблюдают его яркое зеленоватое свечение. При перемешивании раствора его свечение постепенно становится равномерным.

Чтобы выяснить, не является ли это свечение результатом рассеивания зеленых лучей, имеющихся в спектре возбуждающего белого света, снова закрывают объектив поочередно фиолетовым, синим и зеленым светофильтрами. Цвет свечения флюоресцина при этом не изменяется — значит, зеленоватое свечение является излучением молекул флюоресцина.

3. Для демонстрации фотолюминесценции твердых тел вносят в пучок света от проекционного аппарата набор по фосфоресценции, состоящий из трех люминофоров, дающих различное по длительности и цвету свечение — голубое, оранжевое и желтое. Осветив люминофоры в течение 1—2 мин, выключают свет и наблюдают в затемненном помещении люминесценцию твердых люминофоров.

Круг опытов по наблюдению фотолюминесценции жидкостей и твердых тел можно расширить, если воспользоваться дуговой или ртутной лампой. В пучок ультрафиолетовых лучей вносят люминесцирующий экран (рис. 2-96). После нескольких секунд облучения экран выносят из светового пучка и в темноте рассматривают постепенное угасание зеленоватого свечения. В ультрафиолетовых лучах светятся многие вещества, например кожа, ногти, зубная эмаль, молоко, яйца, фрукты, жир и различные красители. Особенно ярко светятся некоторые сорта бумаги и хлопчатобумажные ткани.

Описанные опыты показывают, что возбудить люминесценцию можно различными способами, причем не все вещества могут люминесцировать. Состав света люминесценции отличается от света, который вызвал свечение. Цвет свечения является характерным свойством люминесцирующего вещества и в ряде случаев не зависит от способа возбуждения.

Для люминесценции характерно послесвечение, длительность которого для разных веществ неодинакова. У газов и жидкостей, как видно из проделанных опытов, свечение исчезает практически сразу. Люминесценцию с очень непродолжительным послесвечением называют флюоресценцией.

Продолжительное остаточное свечение наблюдается, как правило, только у твердых тел. Послесвечение может продолжаться много часов и даже суток. Длительную люминесценцию называют фосфоресценцией. Фосфоресцирующие вещества являются своеобразными аккумуляторами света.

Надо обратить внимание школьников на главную особенность люминесценции: люминесцирующее вещество излучает видимый свет, находясь при такой температуре, при которой в тепловом излучении совершенно не содержится видимого излучения. Люминесценция представляет собой избыток свечения тела в определенной спектральной области над его тепловым излучением при данной температуре.

ОПЫТ 98. УСТРОЙСТВО И ДЕЙСТВИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

Оборудование: 1) лампа люминесцентная со стартером и дросселем, 2) провода соединительные с наконечниками.

Широкое практическое применение явления люминесценции получили в люминесцентных лампах для освещения. Эти современные источники света являются более экономичными по сравнению с лампами накаливания (коэффициент светоотдачи у них в 4—5 раз выше, чем у ламп накаливания), кроме того, они дают возможность получения видимого света заданного спектрального состава и, в частности, близкого к солнечному.

Воспользовавшись демонстрационной люминесцентной лампой на панели и схематическим рисунком 2-97, напоминают учащимся ее общее устройство, принцип действия и способ включения в сеть (ч. 1, опыт 177, рис. 3-161).

Люминесцентная лампа представляет собой стеклянную трубку-баллон *1*, наполненную смесью паров ртути и аргона при давлении в несколько миллиметров ртутного столба. С обоих концов в трубку впаяны электроды — нити накала *2* из вольфрамовой активированной проволоки, концы которых выведены к ножкам *3* на цоколях *4*. Внутренняя поверхность трубки равномерно по всей длине покрыта тонким слоем люминофора *5*, преобразующего коротковолновое ультрафиолетовое излучение разряда в парах ртути низкого давления в видимое излучение. В зависимости от состава люминофора можно получить излучение заданного спектрального состава, в том числе и дневного света.

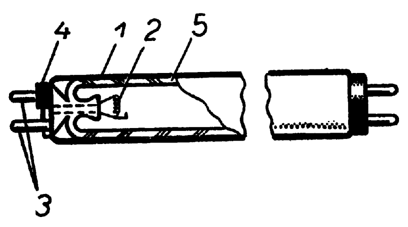


Рис. 2-97. Устройство люминесцентной лампы.

Включают лампу в сеть и демонстрируют ее свечение. При этом полезно для сравнения включить обычную лампу накаливания такой же мощности. С целью подготовки к практикуму следует обратить

внимание учащихся на правила пользования приборами при выполнении лабораторной работы «Сравнение коэффициентов световой отдачи лампы накаливания и люминесцентной лампы»[1].

ОПЫТ 99. ПОЛУЧЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА ИСПУСКАНИЯ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с дуговой лампой, 2) осветитель ультрафиолетовый, 3) угли для дуговой лампы длиной 15—20 см — один сплошной и два начиненных солями металлов, 4) призма прямого зрения или призма дисперсионная, 5) сетка с асбестом.

Наиболее простая и удобная установка для наблюдения на экране линейчатого спектра испускания получается с применением ртутной лампы. В этом случае вся подготовка установки проводится так же, как и для получения сплошного спектра (см. опыт 81). Только вместо осветителя с лампой накаливания устанавливают на оптической скамье проекционного аппарата осветитель ультрафиолетовый с ртутно-кварцевой лампой[2].

На экране учащиеся увидят три яркие линии спектра паров ртути: желто-оранжевую, зеленую и фиолетовую. Четвертая же линия (синяя) выражена слабо. Учащиеся могут ее заметить, если на это специально обратить их внимание.

Так как ртутная лампа должна гореть в горизонтальном положении, то и щель полезно расположить так же, т. е. параллельно оси лампы. Тогда наблюдаемые линии будут видны несколько ярче.

Линейчатый спектр может быть получен и с помощью дуговой лампы. Для проведения этого опыта необходимо заранее подготовить угли, начинив их солями или поместив в них кусочки проволоки (медной, железной или цинковой). С этой целью по оси сплошных углей просверливают небольшой канал (глубиной 20—30 мм и диаметром 2—3 мм), в который плотно набивают соли (глауберову, поваренную, медный купорос) или вставляют небольшие кусочки проволоки. Один уголь можно начинить обычным мелом.

В дуговой лампе горизонтальный уголь должен быть начиненным, а вертикальный — сплошным. Горизонтальный уголь соединяют с положительным полюсом (при питании дуги постоянным током), а вертикальный — с отрицательным.

Во время демонстрации опыта необходимо угли разводить возможно шире и проецировать на экран не кратер, а саму дугу, так как именно в дуге будут содержаться раскаленные пары соответствующего элемента.

После наблюдения одного линейчатого спектра выключают ток и вынимают горизонтальный уголь (закрепленный конец

---

[1] См.: Практикум по физике в средней школе. Под. ред. А. А. Покровского. М., 1973.

[2] Осветитель ультрафиолетовый с ртутно-кварцевой лампой показан во введении.

угля после недлительного горения почти холодный). Вместо него устанавливают другой начиненный уголь и повторяют опыт. Обращают внимание учащихся на то, что характер линейчатого спектра изменился.

Следует иметь в виду, что получаемые таким путем линейчатые спектры оказываются наложенными на сплошной спектр от раскаленных углей дуги.

ОПЫТ 100. ДЕМОНСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма прямого зрения, 3) горелка для получения пламени, окрашенного парами натрия, 4) кювета прямоугольная для проецирования, 5) светофильтры стеклянные — набор, 6) смесь сухого спирта и сульфита натрия, 7) спирт денатурированный в пробирке, 8) растворы двухромовокислого калия и медного купороса, 9) спички.

При изучении спектров поглощения весьма важно показать обращение линии натрия. Это можно сделать, получив пламя, окрашенное парами натрия, с помощью простой самодельной горелки (рис. 2-98). Корпус горелки изготавливают из полоски жести размером 200×40 мм. Закрепляют корпус на стержне, предназначенном для установки горелки в рейтере проекционного аппарата. Над основанием корпуса на высоте 5—7 мм крепят металлическую сетку, на которую помещают горючую смесь из растертой в порошок таблетки сухого спирта и приблизительно такого же количества сульфита натрия Na_2SO_3 [1]. Чтобы порошок не просыпался через сетку, его смачивают несколькими каплями денатурированного спирта до образования густой кашицы, которую и кладут на сетку.

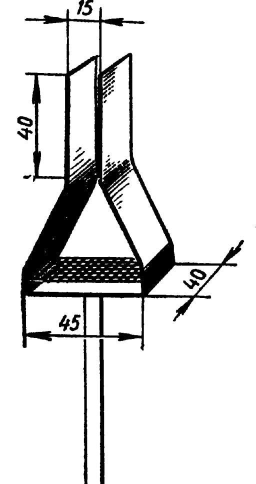


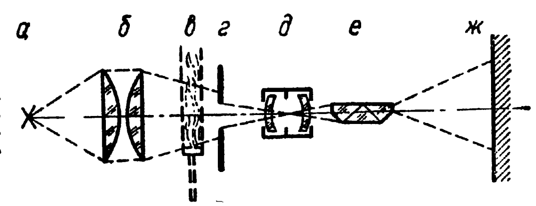
Рис. 2-98. Горелка для получения пламени, окрашенного парами натрия.

Сначала получают на экране отчетливое изображение сплошного спектра. Затем устанавливают горелку с зажженной смесью между щелью и конденсором проекционного аппарата. Свет от конденсора должен проходить через окрашенное пламя (рис. 2-99). При этом на экране появляется хорошо видимая темная узкая линия поглощения натрия. Регулировкой щели добиваются наилучшей четкости линии поглощения. Если после этого закрыть щель наполовину картонкой, поместив ее снизу между конденсором и пламенем, то на экране будет наблюдаться вверху на темном фоне желтая линия испускания натрия, а внизу, в

[1] Возможно применение и других солей натрия, например сернистого натрия (Na_2S) или азотнокислого натрия ($NaNO_3$).

Рис. 2-99. Ход пучков света в установке для демонстрации спектра поглощения:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — пламя, окрашенное парами натрия; *г* — щель; *д* — объектив; *е* — призма прямого зрения; *ж* — экран.



оставшейся половине спектра,— темная линия поглощения. Линии переходят одна в другую при не очень резкой границе между ними. Если полностью закрыть конденсор, то будет видна лишь одна желтая линия испускания натрия.

Для демонстрации спектров поглощения жидких светофильтров следует заранее приготовить водные растворы марганцовокислого калия или медного купороса. Эти растворы хранят в колбах. Перед демонстрацией необходимый раствор наливают в кювету, которую устанавливают в рейтере проекционного аппарата между щелью и объективом. Во время опыта можно концентрацию раствора менять, если предварительно кювету заполнить слабым раствором, а затем добавлять более концентрированный с помощью пипетки.

Точно так же демонстрируют на экране спектры поглощения твердых светофильтров — цветных стекол. При этом на экране будут видны не отдельные линии, а целые полосы поглощения.

ОПЫТ 101. УСТРОЙСТВО СПЕКТРОСКОПА И ПРИЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С НИМ

Оборудование: 1) спектроскоп двухтрубный, 2) трубка спектральная, 3) генератор высоковольтный «Спектр», 4) выпрямитель селеновый ВС-4-12, 5) провода соединительные с наконечниками.

Ознакомление с устройством спектроскопа и приемами обращения с ним имеет целью подготовить учащихся к выполнению в практикуме лабораторной работы «Градуирование спектроскопа и определение длины световой волны по градуировочной кривой».

Сначала показывают общий вид прибора и объясняют его устройство (рис. 2-100). При этом снимают с трехгранной призмы *1* картонную крышку *2*, которой закрывают призму от постороннего света во время опыта.

Непосредственно к столику, на котором расположена призма, примыкают две трубы: коллиматорная *3* с раздвижной щелью *4* и зрительная *5* с окуляром *6*. Обращают внимание учащихся на то, что коллиматорная труба укреплена на столике неподвижно, а зрительная труба с помощью микрометрического винта *7* может перемещаться в горизонтальной плоскости. При этом показывают это смещение, слегка нажав от руки на трубу в направлении, противоположном действию прижимной пружины *8*,

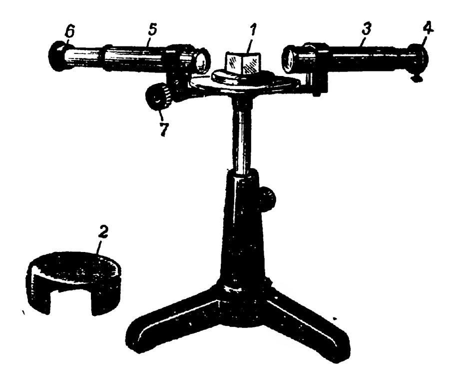


Рис. 2-100. Спектроскоп двухтрубный.

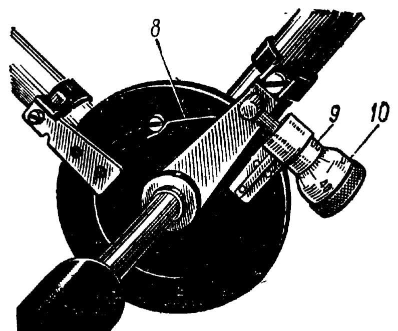


Рис. 2-101. Устройство спектроскопа.

которая расположена с нижней стороны столика (рис. 2-101). Микрометрический винт позволяет осуществить незначительное угловое перемещение зрительной трубы и тем самым совместить изображение нити, натянутой внутри трубы, в плоскости, где образуется спектр, с той или иной частью спектра. Отсчеты производятся по неподвижной шкале *9* и круговой шкале *10*, нанесенной на головке винта. Можно напомнить, как производятся такие отсчеты, используя демонстрационную модель микрометра.

После этого объясняют устройство спектроскопа и ход пучков света в нем (рис. 2-102). Пучок света от источника *А* проходит через щель *Б*, находящуюся в главном фокусе линзы *В*. После линзы свет параллельным пучком падает на грань призмы *Г*.

Проходя через призму, параллельный пучок, дважды преломляясь, разлагается на множество параллельных пучков различной длины волны, которые попадают в зрительную трубу.

Пройдя линзы *Д* и *Е* сложного объектива зрительной трубы, каждый пучок одноцветных лучей дает действительное цветное изображение щели коллиматора. Из ряда таких изображений получается спектр, красная область которого обращена в сторону вершины призмы, а фиолетовая — в сторону основания. Изображение спектра рассматривается через окуляр *Ж*.

Чтобы показать, как следует располагать спектроскоп относительно источника света (газоразрядной трубки), собирают установку, на которой учащиеся будут выполнять лабораторную работу (рис. 2-103).

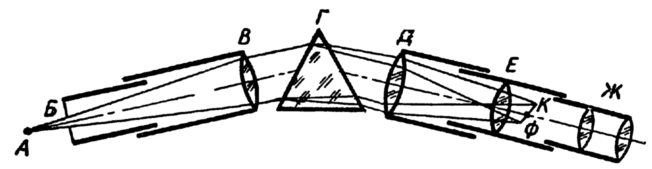


Рис. 2-102. Ход пучков света в спектроскопе.

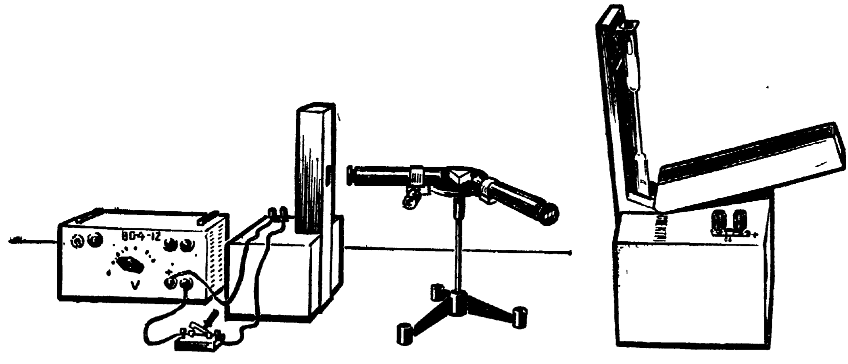


Рис. 2-103. Установка для лабораторной работы со спектроскопом.

Рис. 2-104. Прибор для зажигания спектральных трубок (стойка открыта).

Прибор для зажигания спектральных трубок (генератор высоковольтный «Спектр») подключают к источнику тока (выпрямитель ВС-4-12), соблюдая полярность. Для этого на корпусе прибора имеются обозначения «+» и «—» у винтовых зажимов.

Обращают внимание учащихся на соблюдение мер предосторожности при работе с прибором: высоковольтный генератор включается только на время выполнения наблюдений и отсчетов; замена газоразрядных трубок производится только при выключенном источнике электропитания. При этом необходимо показать, как действует блокировочное устройство, когда производится такая замена: при открывании вертикальной стойки, где устанавливается спектральная трубка (рис. 2-104), автоматически отключается высокое напряжение.

ОПЫТ 102. НАБЛЮДЕНИЕ ЦВЕТНЫХ ЛЕНТ, ПОМЕЩЕННЫХ В РАЗНЫЕ УЧАСТКИ СПЕКТРА

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма прямого зрения, 3) набор цветных лент, 4) экран переносный на стойке.

В опыте применяются цветные ленты из самодельного набора [1]. В набор входят шесть специально подобранных лент из шероховатой материи или цветной бумаги: красная, зеленая, синяя, фиолетовая, неопределенного цвета и черная.

На переносном экране с помощью призмы прямого зрения получают яркий отчетливый спектр. После этого экран убирают и вдоль спектра проносят поочередно различно окрашенные ленты.

[1] См.: Учебное оборудование по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., 1973, с. 291.

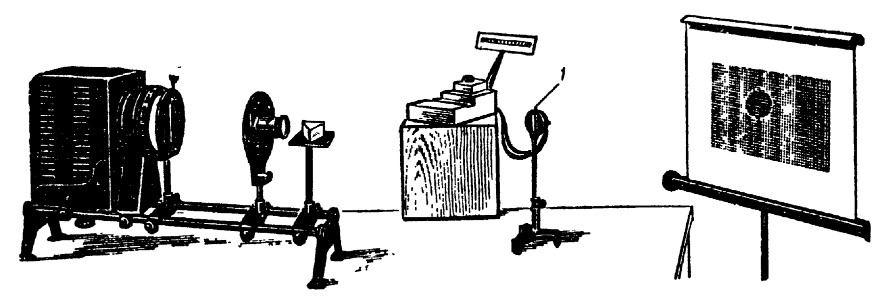


Рис. 2-105. Установка для демонстрации опыта.

Располагая ленты в различных участках спектра, обращают внимание учащихся, что там, где цвет ленты отличен от соответствующего цвета спектра, лента кажется черной. Когда же лента попадает в область того же цвета, в какой она окрашена, то лента кажется ярко освещенной, чем и обнаруживается ее цвет. Очевидно, окрашенная лента кажется ярко окрашенной в соответствующей части спектра потому, что она отражает лучи именно этого цвета, а все остальные поглощает.

Опыт повторяют с несколькими лентами различных цветов, причем черная лента кажется черной во всех частях спектра: она все лучи поглощает. Белая полоска бумаги оказывается ярко окрашенной в любой части спектра: она все лучи одинаково отражает. Лента неопределенного цвета кажется окрашенной в нескольких местах спектра.

ОПЫТ 103. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В НЕПРЕРЫВНОМ СПЕКТРЕ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма дисперсионная «Флинт», 3) термостолбик, 4) гальванометр демонстрационный М1032 [1], 5) экран переносный, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) экран-ширма.

Собирают установку по рисунку 2-105 (на рис. 2-106 показана схема расположения приборов) и получают на экране слегка растянутый спектр (экран ставят под небольшим углом к направлению пучка). Раздвижную щель перед конденсором проекционного аппарата открывают полностью, чтобы получить спектр возможно большей интенсивности. На расстоянии 30—40 см от проекционного аппарата помещают термостолбик. При этом предусматривают возможность его перемещения вдоль всего спектра — от ультрафиолетовой до инфракрасной части. Осветитель проекционного аппарата загораживают от термостолбика экраном-ширмой, чтобы исключить попадание на термостолбик прямых лучей.

[1] Можно воспользоваться и гальванометром от демонстрационного амперметра с усилителем.

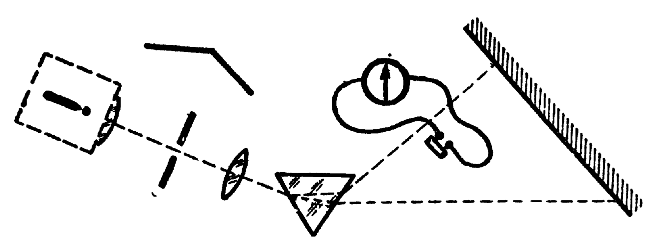


Рис. 2-106. Схема расположения приборов для демонстрации распределения энергии в спектре.

С термостолбика снимают конусную насадку и сверху укрепляют небольшой заостренный картонный (или пластилиновый) указатель *1*. Тень указателя хорошо видна на экране, и по ней удобно наблюдать за положением окна термостолбика в спектре.

Установив световой указатель гальванометра, соединенного с термостолбиком, на нулевое деление шкалы (начало горизонтального участка), вносят термостолбик сначала в фиолетовую часть спектра. Выждав некоторое время, замечают слабое отклонение указателя гальванометра. Затем через определенные интервалы времени переставляют термостолбик в сторону красной части спектра и наблюдают увеличение показаний гальванометра. При этом каждый раз выжидают, пока указатель гальванометра установится. Так постепенно проходят по всему спектру и обнаруживают, что максимальное показание гальванометра наблюдается за красной частью спектра — в инфракрасной области.

Чтобы в процессе демонстрации подчеркнуть, на какое место спектра приходится максимум энергии излучения, перемещают термостолбик несколько раз около этого места и показывают, что при его смещении вправо и влево показания гальванометра уменьшаются. Продвигая дальше термостолбик в инфракрасной части спектра, наблюдают постепенное уменьшение показаний гальванометра и возвращение светового указателя на нулевое деление шкалы.

При выполнении описанного опыта не производятся отсчеты показаний гальванометра и не вычерчивается график. Основная цель эксперимента состоит в том, чтобы познакомить учащихся с методом наблюдений. Это способствует пониманию учащимися кривых распределения энергии в спектре, которые целесообразно представить на таблице (рис. 2-107).

Термостолбик относится к числу чувствительных приборов, и его применение в качестве индикатора излучения требует соблюдения определенных правил:

1. Нужно заботиться об исключении воздействия на него посторонних излучений и потоков воздуха (не допускать сквозняков), могущих вызвать добавочное нагревание или охлаждение прибора,

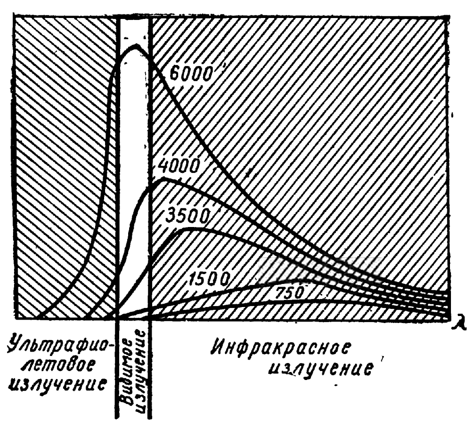


Рис. 2-107. Кривые распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при различных температурах.

2. Не следует часто прикасаться к корпусу прибора руками, так как это может привести к нагреву нерабочих спаев и появлению обратного тока.

3. В целях увеличения чувствительности прибора открытая рабочая часть термобатареи покрыта тонким слоем копоти, который периодически необходимо восстанавливать. Для этого надо прибор подержать рабочей частью над пламенем керосиновой горелки при неполном сгорании керосина, следя за тем, чтобы не разогрелся весь прибор, иначе может расплавиться имеющаяся внутри корпуса мастика.

ОПЫТ 104. ОБНАРУЖЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРЕ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма прямого зрения или призма дисперсионная «Флинт», 3) фотоэлемент кремниевый на стойке, 4) гальванометр демонстрационный от амперметра, 5) экран переносный, 6) ящик-подставка.

Собирают установку по рисунку 2-108 и с помощью призмы прямого зрения или трехгранной призмы «Флинт» получают на переносном экране яркий сплошной спектр. Чтобы растянуть спектр, экран немного поворачивают. Кроме того, его располагают так, чтобы за красным краем спектра оставалось свободное место.

На расстоянии 1—1,5 м от призмы помещают фотоэлемент, соединенный с гальванометром. Если опыт проводится в пол-

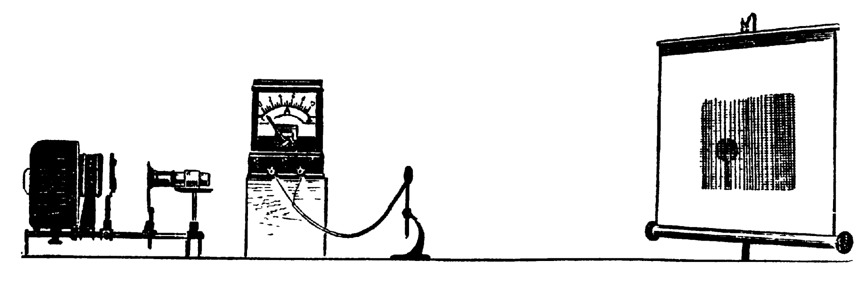


Рис. 2-108. Установка для демонстрации инфракрасной части спектра.

ностью затемненном помещении, то шкалу гальванометра следует подсветить, например, при помощи осветителя для теневого проецирования и подсвета.

Медленно перемещают фотоэлемент перпендикулярно световым лучам от фиолетового края спектра в сторону красного края (тень от фотоэлемента проецируется на экран) и наблюдают за стрелкой гальванометра.

По мере продвижения фотоэлемента показания гальванометра постепенно растут, достигая наибольшего значения, когда фотоэлемент находится за видимой красной частью спектра. Таким образом и обнаруживается инфракрасная область спектра.

Дальнейшее продвижение фотоэлемента приводит к постепенному уменьшению показаний гальванометра и возвращению стрелки в первоначальное положение.

ОПЫТ 105. ВЫДЕЛЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ ФИЛЬТРАМИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) призма прямого зрения или призма дисперсионная «Флинт», 3) фотоэлемент кремниевый на стойке, 4) гальванометр демонстрационный от амперметра, 5) светофильтр, пропускающий инфракрасные лучи, 6) светофильтр, поглощающий инфракрасные лучи, 7) набор пластинок размером 6×10 см из стекла, слюды, тонкого эбонита (0,1—0,2 мм), 8) экран переносный.

Пользуясь установкой, изображенной на рисунке 2-108 (фотоэлемент оставляют в инфракрасной части спектра), показывают неодинаковое поглощение и пропускание инфракрасных лучей различными телами. Сначала на пути светового пучка после дисперсионной призмы помещают фильтр поглощения (прозрачное для видимых лучей стекло) и наблюдают резкое (почти до нуля) уменьшение показаний гальванометра, хотя спектр по-прежнему хорошо виден на экране.

Затем заменяют прозрачное стекло черным (фильтр, пропускающий инфракрасные лучи) и обнаруживают, что вся видимая часть спектра поглощается, однако показания гальванометра остаются почти такими же, как и до установки фильтра. Учащиеся убеждаются в том, что демонстрируемый фильтр позволяет выделить инфракрасный пучок.

Далее на той же установке проводят испытание, показывающее, насколько хорошо пропускают или поглощают инфракрасные лучи различные сорта стекла, тонкая бумага, слюда, тонкий эбонит, раствор медного купороса и др.

Чтобы выделить параллельный пучок инфракрасных лучей, вынимают из конденсора проекционного аппарата одну линзу и получают сначала параллельный пучок белого света, который особенно хорошо станет заметным, если в него ввести немного дыма. Затем вплотную к тубусу конденсора устанавливают

фильтр пропускания. Полученный таким образом невидимый пучок инфракрасных лучей обнаруживают при помощи фотоэлемента, присоединенного к гальванометру. Интенсивность пучка инфракрасного излучения можно изменять, уменьшая накал лампы.

Параллельный пучок инфракрасных лучей можно получить и с помощью осветителя для теневого проецирования и подсвета. С этой целью вместо съемной крышки на осветитель надевают небольшую насадку, имеющую вогнутую хорошо отражающую поверхность (рефлектор от велосипедной фары). Перемещая вдоль корпуса прибора патрон с лампочкой, добиваются получения параллельного пучка света. После этого закрывают насадку фильтром, пропускающим инфракрасные лучи. Такой переносный «осветитель» оказывается в некоторых опытах весьма удобным.

ОПЫТ 106. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) фильтр, пропускающий инфракрасные лучи, 3) фотоэлемент кремниевый на стойке, 4) гальванометр демонстрационный от амперметра, 5) призма дисперсионная «Флинт», 6) зеркало вогнутое, 7) диафрагма щелевая, 8) лапка от штатива, 9) отрезок черной фотопленки (засвеченный кадр), 10) экран настольный.

Выделяют параллельный пучок инфракрасного излучения (см. описание предыдущего опыта) и направляют его под некоторым углом на белый настольный экран. Затем на расстоянии 1—1,5 м от экрана располагают соединенный с гальванометром фотоэлемент таким образом, чтобы перпендикуляр к его рабочей поверхности образовывал с плоскостью экрана такой же угол, как и падающий пучок (рис. 2-109). Наблюдают заметное отклонение стрелки гальванометра.

Накрывают экран серой газетной бумагой. Убеждаются, что такая поверхность отражает инфракрасные лучи хуже (показания гальванометра уменьшаются).

Бумагу убирают и слегка изменяют положение экрана, пово-

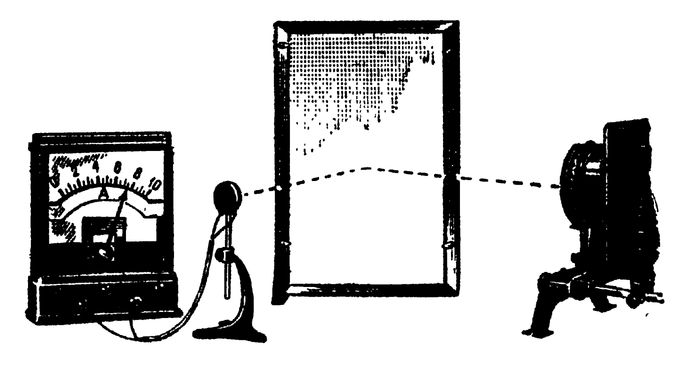


Рис. 2-109. Демонстрация отражения инфракрасных лучей от экрана.

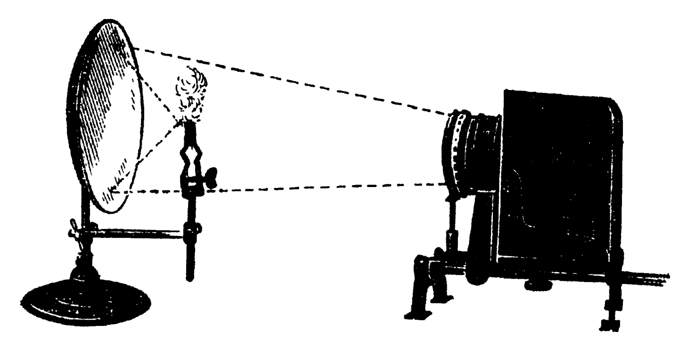


Рис. 2-110. Отражение инфракрасных лучей от вогнутого зеркала и зажигание пленки.

рачивая его вокруг вертикальной оси. Обращают внимание на изменение показаний гальванометра. Фиксируя положение фотоэлемента, соответствующее наибольшему отклонению стрелки гальванометра, показывают учащимся, что при отражении инфракрасных лучей угол падения равен углу отражения.

Поворачивают экран черной стороной к пучку инфракрасных лучей и убеждаются, что теперь при любом положении экрана ток в гальванометре не обнаруживается: черная матовая поверхность полностью поглощает все инфракрасные лучи.

После этого демонстрируют отражение инфракрасных лучей от вогнутого зеркала. От проекционного аппарата направляют немного расходящийся пучок света на вогнутое зеркало. Расстояние от зеркала до аппарата должно быть 1—1,5 м.

Определяют экспериментально точку, в которой пересекаются отраженные от зеркала световые лучи, и устанавливают в этом месте лапку от штатива.

Перед конденсором помещают фильтр, пропускающий инфракрасное излучение (рис. 2-110). Закрывают конденсор на некоторое время куском картона и в лапке зажимают небольшой кусок темной (засвеченной) легковоспламеняющейся фото- или кинопленки.

Сосредоточив внимание учащихся на описанной установке, убирают картон. Через несколько секунд пленка, нагретая невидимым для наблюдателя инфракрасным излучением, сначала начинает дымить, а затем вспыхивает.

Для демонстрации преломления инфракрасных лучей выделяют с помощью щелевой диафрагмы, установленной на скамье проекционного аппарата, узкий параллельный пучок инфракрасных лучей. С помощью фотоэлемента, соединенного с гальванометром и помещенного на расстоянии 1—1,5 м от проекционного аппарата, определяют направление пучка.

Вблизи щели устанавливают на подъемном столике трехгранную призму так, чтобы весь пучок попадал под некоторым углом

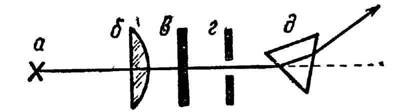


Рис. 2-111. Схема установки для демонстрации преломления инфракрасных лучей:

а — источник света; *б* — конденсор; *в* — фильтр; *г* — диафрагма; *д* — призма.

на одну из ее граней (рис. 2-111). Стрелка гальванометра вернется на нулевое деление шкалы, так как инфракрасные лучи, преломляясь в призме, отклоняются от своего первоначального направления. Перенося фотоэлемент, находят такое его положение (при сохранении прежнего расстояния от призмы), в котором стрелка гальванометра снова отклоняется. (Некоторое уменьшение показаний гальванометра объясняется тем, что инфракрасные лучи частично отражаются и поглощаются призмой.)

Не меняя установки, поворачивают немного призму вокруг вертикальной оси и снова определяют при помощи фотоэлемента направление прошедшего через призму пучка инфракрасных лучей. При этом место расположения фотоэлемента полезно определить заранее пучком видимого света.

Чтобы еще раз подчеркнуть, что инфракрасные лучи преломляются, можно продолжить опыт и с помощью конденсора проекционного аппарата получить сходящийся пучок лучей. Экспериментально определить место их пересечения, поместить в нем небольшой отрезок пленки, закрепленной в лапке от штатива, и эксперимент проводить так же, как и в случае зажигания пленки в фокусе вогнутого зеркала.

При окончательном определении места расположения пленки следует иметь в виду, что для инфракрасных лучей фокус находится несколько дальше от конденсора, чем для пучка видимого света.

ОПЫТ 107. СИГНАЛИЗАЦИЯ ИНФРАКРАСНЫМИ ЛУЧАМИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) фильтр, пропускающий инфракрасное излучение, 3) фотоэлемент кремниевый на стойке, 4) универсальный усилитель из комплекта приборов по радиотелемеханике, 5) звонок демонстрационный электрический, 6) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 7) провода соединительные с наконечниками.

На одном конце демонстрационного стола устанавливают источник инфракрасных лучей — проекционный аппарат с однолинзовым конденсором и фильтром, пропускающим инфракрасные лучи. На другом конце стола располагают фотоэлемент, соединенный с универсальным усилителем из комплекта приборов по радиотелемеханике; в исполнительную цепь включают электрический звонок (рис. 2-112).

Если перекрыть пучок инфракрасных лучей каким-нибудь непрозрачным для этих лучей предметом, то исполнительная цепь реле замкнется и звонок даст сигнал. В этом и заключается принцип действия автоматической защиты с помощью невидимых для глаза лучей.

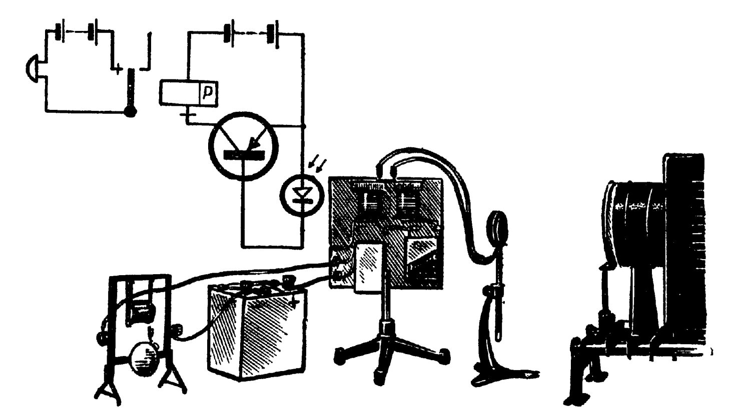


Рис. 2-112. Схема и установка сигнализации инфракрасными лучами.

Так как чувствительность установки большая, то фотоэлемент с усилителем, аккумулятором и электрическим звонком можно поместить на переносном столике и расположить в 3—5 м от демонстрационного стола. В этом случае можно предложить нескольким ученикам пройти по классу, пересекая невидимый инфракрасный пучок. Каждый раз звонок будет давать сигнал.

ОПЫТ 108. ОБНАРУЖЕНИЕ И ВЫДЕЛЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Оборудование: 1) аппарат проекционный с дуговой лампой, 2) призма дисперсионная «Флинт», 3) осветитель ультрафиолетовый, 4) экран люминесцирующий, 5) экран настольный, 6) штатив универсальный.

Располагают приборы, как описано в опыте 104, и получают на настольном экране небольшой, но яркий сплошной спектр от дуговой лампы проекционного аппарата.

Затем закрепленный в лапке штатива люминесцирующий экран устанавливают так, чтобы его нижний правый угол перекрывал верхнюю часть фиолетовой области спектра (рис. 2-113). При этом наблюдают, что на люминесцирующем экране спектр становится длиннее: внесенный экран светится светло-зеленым светом и в невидимой части спектра.

Таким образом учащиеся убеждаются в наличии излучения за фиолетовой частью спектра.

Для получения достаточно интенсивного пучка ультрафиолетового излучения пользуются осветителем с ртутно-кварцевой лампой, например ДРТ-220, и специальным темным фильтром — увиолевым стеклом, пропускающим ультрафиолетовые лучи.

Направив пучок ультрафиолетового излучения так, чтобы он не попадал на учащихся, вносят в него различные люминесцирующие вещества и наблюдают их яркое разноцветное свечение.

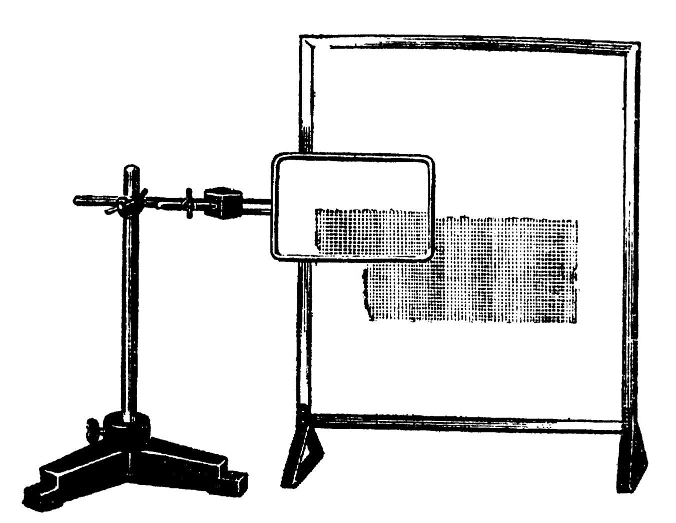


Рис. 2-113. Свечение люминесцирующего экрана в ультрафиолетовой части спектра.

В качестве люминесцирующих образцов можно использовать входящие в набор по флюоресценции три стеклянные запаянные трубки, наполненные растворами эозина, флюоресцина и родамина, а также набор по фосфоресценции в виде трех секторов с люминофорами в пластмассовой коробочке и экран, покрытый фосфоресцирующими солями. С помощью последнего показывают явление послесвечения, т. е. продолжительное свечение после облучения.

109. КИНОФИЛЬМ «РЕНТГЕНОВЫ ЛУЧИ»

Оборудование: 1) кинофильм «Рентгеновы лучи»[1], 2) кинопроектор.

Перед демонстрацией учебного кинофильма полезно рассказать об устройстве рентгеновской трубки.

Рентгеновская (электронная) трубка (рис. 2-114) представляет собой стеклянную трубку *1*, в которой создан глубокий вакуум (давление газа в ней 10^{-3}—10^{-5} Па). В качестве источника электронов служит накаливаемый электрическим током катод в виде вольфрамовой спирали *2* (нить накала). Против катода расположен второй электрод — анод *3*, представляющий собой массивное металлическое тело с полированным косым срезом. Между катодом и анодом создается большая разность потенциалов — десятки и сотни киловольт. Благодаря этому электроны, вылетевшие из катода, получают большую скорость. Ударяясь о противоположный электрод — анод, они испытывают резкое

[1] Рентгеновы лучи. Киевская киностудия научно-популярных фильмов, 1966, 1 ч. (3 фрагм.). Продолжительность демонстрации — 10 мин.

торможение, вследствие чего возникает рентгеновское излучение. При торможении электронов часть энергии идет на нагревание анода, поэтому в современных мощных трубках его делают массивным, а в некоторых случаях применяют и дополнительное охлаждение (водяное или масляное).

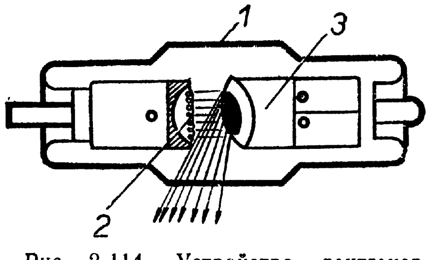


Рис. 2-114. Устройство рентгеновской трубки.

После этого демонстрируют кинофильм «Рентгеновы лучи», где сначала показываются различные типы рентгеновских трубок, рассматривается устройство одной из них и объясняется принцип возникновения рентгеновского излучения (первый фрагмент фильма).

Во втором фрагменте рассматриваются свойства и природа рентгеновских лучей, рассказывается о проникающей способности и ее зависимости от толщины слоя вещества. Дается понятие о мягком и жестком излучении, об ионизирующей способности лучей. В конце фрагмента рассказывается об установлении волновой природы рентгеновых лучей в опытах по дифракции их на кристалле каменной соли и об определении длины волны рентгеновских лучей.

Третий фрагмент фильма знакомит с различными применениями рентгеновских лучей. Показываются рентгеновские установки, применяемые в медицине для лечения и диагностики болезней, а также рентгеновские дефектоскопы для обнаружения скрытых дефектов в металлических изделиях.

§ 5. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

ОПЫТ 110. ОБНАРУЖЕНИЕ КВАНТОВ СВЕТА

Оборудование: 1) индикатор фотонов, 2) усилитель низкой частоты демонстрационный, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) выпрямитель универсальный ВУП, 5) лампа электрическая на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками.

В опыте применяют самодельный индикатор фотонов, изготовленный из стабилитрона СГ-4С.

Стабилитрон типа СГ-4С имеет стеклянный баллон, наполненный смесью инертных газов при низком давлении. Внутри его находятся два электрода. Цилиндрический электрод, закрытый с обоих концов слюдяными пластинками, является катодом. Вдоль оси цилиндрического электрода (катода) укреплен анод — отрезок никелевой проволоки. Поверхность катода активирована слоем бария, тория или цезия. Активирование катода значительно понижает потенциал зажигания лампы, который у

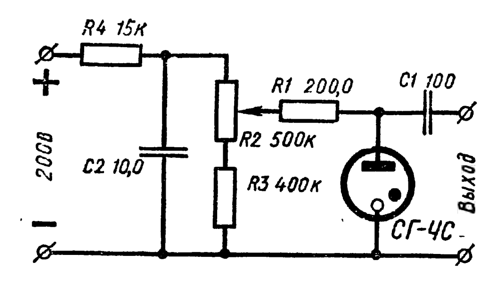


Рис. 2-115. Схема индикатора фотонов на стабилитроне СГ-4С.

данного стабилитрона равен 180 В.

В режиме индикатора работает не каждый стабилитрон; поэтому необходимо испытать в действии несколько и выбрать из них наилучший. Важно, чтобы слюдяные пластины, закрывающие цилиндрический катод, были по возможности более прозрачны.

Электрическая схема индикатора представлена на рисунке 2-115. Напряжение к электродам стабилитрона подается с потенциометра $R_2=500$ кОм через нагрузочный резистор $R_1=$ $=200$ МОм. Для плавного регулирования этого напряжения последовательно с потенциометром R_2 включается резистор $R_3=$ $=400$ кОм, на котором падает примерно половина напряжения, снимаемого с выпрямителя. Резистор $R_4=15$ кОм вместе с электролитическим конденсатором $C_2=10$ мкФ на 300—400 В служит дополнительной ячейкой сглаживающего фильтра выпрямителя.

Напряжение на стабилитроне устанавливается несколько меньшим напряжения его зажигания.

При попадании фотона или ионизирующей частицы в лампу в ней вспыхивает коронный разряд, который за счет большого падения напряжения на резисторе R_1 быстро прекращается.

Восстанавливается первоначальный режим индикатора, и он становится чувствительным для регистрации следующей ионизирующей частицы. Время восстановления в основном определяется произведением R_1C, где C — входная емкость стабилитрона (включая и емкость монтажа).

Из-за большой величины сопротивления резистора R_1 время восстановления велико, что ограничивает скорость счета. В результате индикатор не регистрирует значительную долю влетающих в него частиц. Однако для демонстрационных опытов это не имеет большого значения.

Через конденсатор $C_1=100$ пФ импульсы подаются на вход

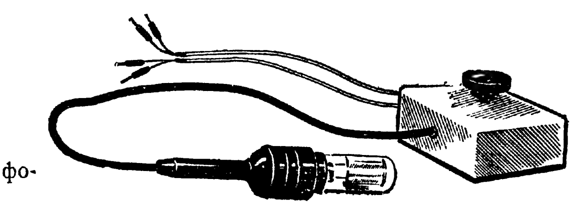
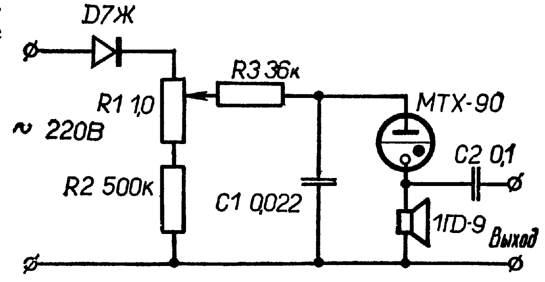


Рис. 2-116. Индикатор фотонов.

Рис. 2-117. Схема индикатора фотонов на тиратроне МТХ-90.



усилителя и воспроизводятся громкоговорителем в виде громких щелчков.

Делитель напряжения монтируется внутри алюминиевой коробки размером 10×12×15 см. Ручка потенциометра выводится наверх (рис. 2-116).

От делителя напряжения выводят три пары проводов длиной около 50 см. По ним подается напряжение на делитель, с делителя — на индикатор, с индикатора — на усилитель. Экранированные провода, по которым напряжение подается к стабилитрону, заканчиваются ламповой панелькой, вмонтированной в электроламповый патрон. Конец внутреннего провода припаивается к пятому лепестку, а экран — ко второму лепестку панельки. Провода, идущие к усилителю, также должны быть заключены в экран.

Индикатор фотонов видимого света можно собрать также на тиратроне МТХ-90 по схеме, показанной на рисунке 2-117[1].

Индикатор представляет собой фоторелаксационный генератор, который генерирует только при освещении катода.

Он работает следующим образом. При освещении катода зажигается тиратрон. Конденсатор C_1 быстро разряжается через тиратрон и громкоговоритель. Возникший импульс тока регистрируется громкоговорителем в виде щелчка, громкость которого зависит от емкости конденсатора C_1. Число разрядов в единицу времени пропорционально числу фотонов, падающих на фотокатод.

Импульсы тока можно подать через конденсатор C_2 на вход дополнительного усилителя, декатронного счетчика, осциллографа и пр.

Для проведения демонстрации собирают установку по рисунку 2-118.

Вначале индикатор закрывают от света колпаком из черной бумаги. Поворачивая ручку потенциометра, увеличивают напряжение на индикаторе до тех пор, пока в громкоговорителе не бу-

---

[1] См.: Таргов П., Иванов Д. Еще один способ индикации фотонов видимой области спектра.— «Физика в школе», 1973, № 1, с. 55—56; Соколов В. С. Об индикации фотонов в видимой области спектра.— «Физика в школе», 1976, № 2, с. 74.

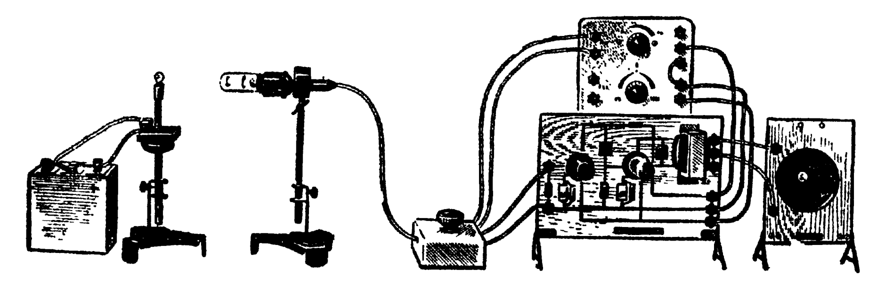


Рис. 2-118. Демонстрация действия индикатора фотонов.

дут слышны громкие щелчки, обусловленные действием космических лучей и рассеянного радиоактивного излучения. Этот «фон» составляет около десятка «щелчков» в минуту.

Затем индикатор освещают электрической лампой. Частота щелчков в громкоговорителе резко увеличивается.

При приближении осветителя к индикатору число регистрируемых фотонов возрастает.

Из опыта делают вывод: излучение и поглощение света происходит квантами.

ОПЫТ 111. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ НА ЦИНКОВОЙ ПЛАСТИНКЕ

Оборудование: 1) осветитель ультрафиолетовый или лампа дуговая, 2) электрометр, 3) пластинка цинковая, 4) палочки из эбонита и стекла для электризации, 5) мех, кожа, 6) штатив универсальный, 7) кусок картона.

Цинковую пластинку, например из набора по электролизу, зачищают с одной стороны до блеска и при помощи небольшой трубочки устанавливают вертикально на стержне электрометра (рис. 2-119).

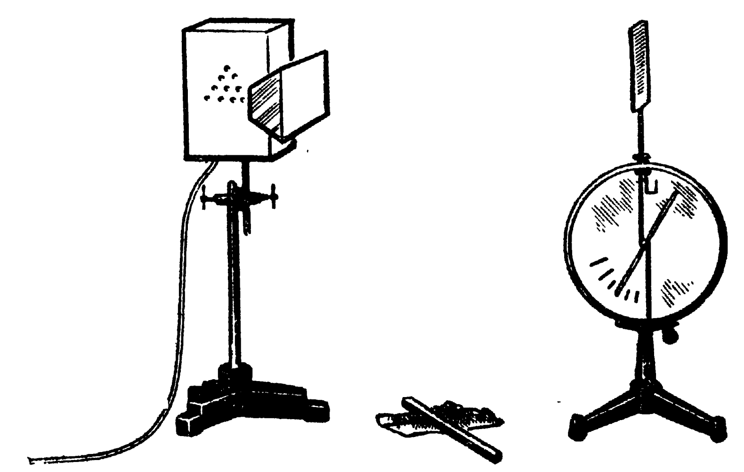


Рис. 2-119. Демонстрация внешнего фотоэффекта на цинковой пластинке.

На расстоянии примерно 50 см от электрометра укрепляют в штативе осветитель с ртутно-кварцевой лампой и включают его в сеть (описание осветителя см. во введении). Отверстие в корпусе лампы закрывают ширмой — куском картона.

Пластинку поворачивают зачищенной стороной к лампе и заряжают отрицательно от эбонитовой палочки.

Как только стрелка электрометра установится и учащиеся убедятся, что заряд на пластинке хорошо сохраняется, быстро отодвигают в сторону ширму и наблюдают постепенную потерю цинковой пластинкой отрицательного заряда.

Обращают внимание на то, что разряд электрометра начинается сразу же после освещения пластинки и быстро прекращается, если свет лампы снова закрыть ширмой.

После этого цинковую пластинку заряжают положительно от стеклянной палочки. Знак заряда проверяют с помощью заряженной эбонитовой палочки: приближение ее к пластинке уменьшает угол отклонения стрелки электрометра. Затем ширму снова отодвигают в сторону и убеждаются, что стрелка электрометра остается неподвижной даже при продолжительном облучении. Свет не может выбить из цинка положительные заряды; электроны же из положительной пластины не выбиваются потому, что они удерживаются электрическим полем положительного заряда.

Далее освещают незаряженную пластинку. Начавшийся на ней в первый момент фотоэффект очень скоро прекращается, так как, потеряв часть электронов, пластинка оказывается заряженной положительно. Этот заряд очень мал и школьным электрометром не обнаруживается.

Если к цинковой пластинке постепенно приближать положительно заряженную стеклянную палочку, стрелка электрометра все больше отклоняется от нулевого деления шкалы и не возвращается к нему после удаления палочки. Исследование показывает, что оставшийся на пластинке заряд является положительным. Это означает, что цинк под действием падающего на него излучения терял электроны. Процесс этот продолжался все время, поскольку электрическое поле положительно заряженной палочки помогло удалять с пластины отрицательный заряд. Это и привело к накоплению на электрометре значительного по величине положительного заряда, который уже обнаруживается.

Эти опыты убеждают учащихся в том, что причиной ухода зарядов с цинковой пластины является свет и что под действием квантов света из цинковой пластинки выбиваются только отрицательные заряды — электроны.

Учащимся поясняют, что практически мгновенное возникновение фотоэффекта нельзя объяснить с точки зрения волновых представлений о свете; согласно этим представлениям между началом облучения и моментом вылета электрона должно прой-

ти некоторое время, связанное с постепенным накапливанием, электроном энергии за счет поглощения приходящих волн.

Безынерционность фотоэффекта доказывает квантовую природу света. Электрон, получив при благоприятных условиях энергию отдельного кванта, сразу покидает поверхность вещества.

В этом и последующих опытах следует иметь в виду, что при работе с ртутной лампой необходимо предохранять глаза от действия ультрафиолетового излучения: нельзя допускать попадания лучей от лампы в сторону класса; учитель должен пользоваться специальными очками.

Вместо ртутной лампы можно применять в качестве осветителя дуговую лампу с взаимно перпендикулярным расположением углей. Последние следует заправить кусочками алюминиевой проволоки для увеличения потока ультрафиолетовых лучей.

ОПЫТ 112. ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА ОТ РОДА ВЕЩЕСТВА, СВЕТОВОГО ПОТОКА И ЧАСТОТЫ СВЕТА

Оборудование: 1) осветитель ультрафиолетовый или электрическая дуга, 2) электрометр, 3) секундомер электромеханический демонстрационный, 4) пластинки: цинковая, медная, свинцовая, алюминиевая, стеклянная и пластинка, покрытая сажей, 5) палочка из эбонита для электризации и мех, 6) штатив универсальный, 7) кусок картона, 8) кусок оконного стекла, целлофана или тонкого органического стекла, 9) метр демонстрационный, 10) лампа электрическая.

1. После обнаружения фотоэффекта на цинковой пластинке очень важно показать это явление на других металлах, а также на неметаллических телах.

Для этого описанный выше опыт повторяют в первую очередь с медной и свинцовой пластинками из набора по электролизу. Желательно также приготовить пластинки из других металлов и провести с ними опыт. Все пластинки с одной стороны предварительно зачищают наждачной бумагой до блеска, а их края округляют и шлифуют. В качестве неметаллического вещества удобно взять сажу; ее наносят тонким слоем на металлическую пластинку, для чего последнюю помещают в коптящее пламя керосиновой горелки.

Пластинки поочередно устанавливают на электрометре, заряжают отрицательно до одинакового потенциала, а затем разряжают при помощи светового пучка от ртутной или дуговой лампы (рис. 2-120). Время разряда в каждом случае измеряют при помощи демонстрационного секундомера.

Измерения показывают, что медленнее всех разряжается пластинка, покрытая сажей, а быстрее — цинковая; немного медленнее цинковой разряжается алюминиевая пластинка и еще примерно в два раза медленнее теряют заряд свинцовая и медная пластинки.

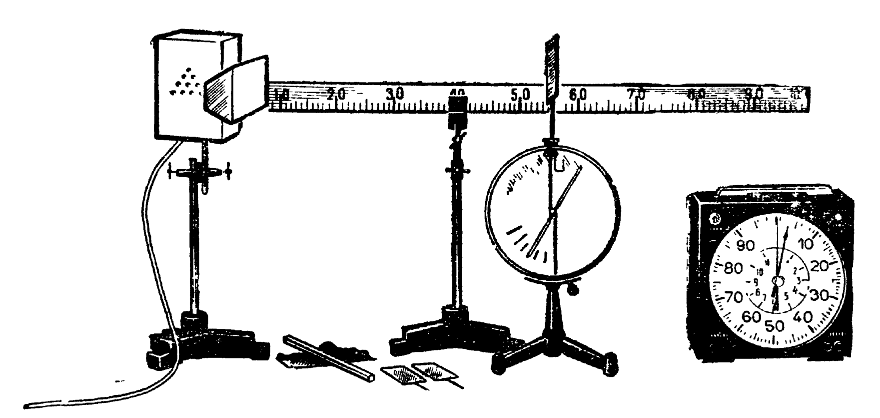


Рис. 2-120. Демонстрация зависимости фотоэффекта от рода вещества, светового потока и частоты света.

Так как размеры пластин, начальный заряд и величина светового потока в этих опытах не меняются, то результаты измерения разряда пластин позволяют сделать важный вывод о том, что различные тела под действием света неодинаково освобождают электроны. Иначе говоря, величина так называемой работы выхода электронов у различных тел различна. Чем работа выхода меньше, тем больше электронов выбивает свет в единицу времени и тем быстрее пластинка разряжается.

В связи с этим желательно познакомить учащихся с табличными данными работы выхода у различных металлов и отметить, что она имеет наименьшее значение у щелочных металлов (калий, цезий). По этой причине щелочные металлы широко применяются для изготовления катодов современных фотоэлементов.

2. Электрометр с цинковой пластинкой располагают на расстоянии 50 см от ртутной лампы и заряжают отрицательно. Отодвинув в сторону ширму, наблюдают начавшийся разряд пластинки. Как только стрелка электрометра будет проходить, например, пятое деление шкалы, включают демонстрационный секундомер и измеряют время полного разряда пластинки.

После этого световой поток уменьшают в четыре раза (электрометр отодвигают от лампы на расстояние 100 см) и повторяют опыт.

Даже при такой несовершенной постановке опыта можно показать, что интенсивность фотоэффекта, определяемая числом электронов, вылетающих в единицу времени с единицы поверхности тела, прямо пропорциональна величине падающего светового потока (закон Столетова).

3. Снова заряжают цинковую пластинку отрицательно и освещают ее зачищенную сторону лампой накаливания. Убеждаются в полном отсутствии фотоэффекта. Затем зажигают ртутную лампу и перекрывают выходящий из нее световой пучок оконным

стеклом. Проходящий через стекло свет также не оказывает действия на отрицательный заряд цинковой пластинки. Фотоэффект не наблюдается и в том случае, если увеличить освещенность цинковой пластинки (приблизить электрометр к лампе).

Затем вместо оконного стекла берут тонкую пластинку из плексигласа или целлофана, пропускающих длинноволновую часть ультрафиолета. Теперь электрометр обнаруживает потерю отрицательного заряда цинковой пластиной, но на меди и свинце фотоэффект не наблюдается.

Если световой пучок от лампы перекрыть увиолевым стеклом, прозрачным для широкого диапазона ультрафиолетового излучения и непрозрачным для видимого света, то фотоэффект наблюдается на различных металлах.

Опираясь на эти опыты, подводят учащихся к выводу, что для каждого вещества фотоэффект наступает при определенной частоте света, независимо от величины светового потока. Граница фотоэффекта целиком определяется величиной работы выхода электронов с поверхности тела.

В связи с этим полезно познакомить учащихся с таблицей, в которой указаны значения граничных частот света для различных металлов, и отметить, что граница фотоэффекта у таких распространенных металлов, как цинк, медь, свинец, алюминий, лежит в ультрафиолетовой части спектра, тогда как у щелочных металлов (натрий, калий) она находится в видимой, а у цезия даже в инфракрасной части спектра. Поэтому в фотоэлементах, чувствительных к видимому свету, катоды обрабатывают щелочными металлами.

ОПЫТ 113. ЗАКОНЫ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Оборудование: 1) фотоэлемент СЦВ-4 на подставке, 2) гальванометр демонстрационный от амперметра, 3) усилитель к гальванометру, 4) вольтметр демонстрационный, 5) выпрямитель универсальный ВУП, 6) аппарат проекционный, 7) батареи аккумуляторов — 3 шт., 8) реостат сопротивлением 600 Ом, 9) метр демонстрационный, 10) штатив универсальный, 11) провода соединительные с наконечниками, 12) кинофильм «Фотоэффект», 13) кинопроектор.

Для демонстрации законов фотоэффекта собирают установку по рисунку 2-121. В корпус осветителя проекционного аппарата вставляют автомобильную лампу («точечный» источник света), а конденсор снимают. Позади проекционного аппарата горизонтально укрепляют демонстрационный метр так, чтобы его начало приходилось против нити лампы. В рейтере укрепляют вакуумный фотоэлемент СЦВ-4, смонтированный на самодельной подставке; фотоэлемент включают в электрическую цепь по схеме, показанной на рисунке 2-122, *а* (схему вычерчивают на классной доске).

Регулируемое постоянное напряжение берут от универсального выпрямителя (зажимы 0 ± 100) и контролируют демонстра-

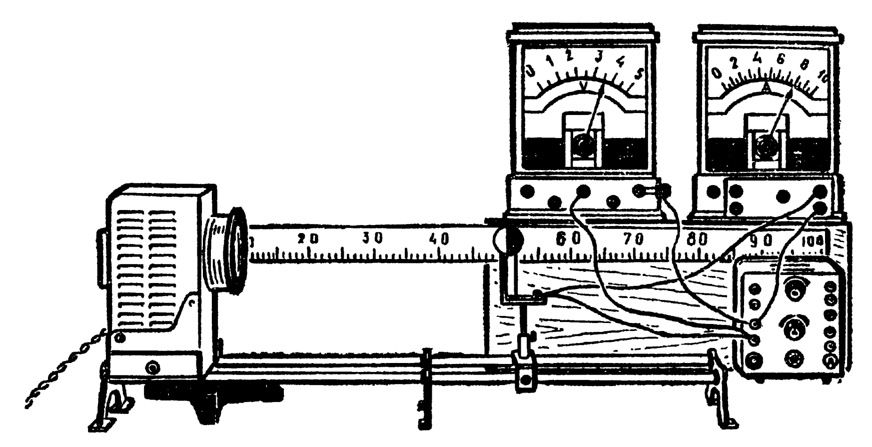


Рис. 2-121. Установка для демонстрации законов фотоэффекта.

ционным вольтметром. Гальванометр включают в цепь совместно с усилителем постоянного тока. Автомобильную лампу питают от батареи аккумуляторов.

Кратко объясняют собранную установку и в полузатемненном классе приступают к демонстрации опытов:

1. Фотоэлемент устанавливают на расстоянии примерно 40 см от лампы и при неизменном световом потоке постепенно увеличивают напряжение на его электродах. Ток сначала увеличивается пропорционально приложенному напряжению, а затем, начиная примерно с 30 В, достигает некоторого постоянного значения (ток насыщения).

Учащимся поясняют, что ток насыщения возникает в тот момент, когда все вылетающие с катода электроны доходят до анода. Дальнейшее увеличение тока может быть достигнуто лишь при увеличении светового потока. Приближают фотоэлемент к лампе и убеждаются в этом.

2. Фотоэлемент возвращают в исходное положение и при неизменном напряжении на электродах замечают по гальванометру величину тока насыщения. Затем световой поток, падающий на фотоэлемент, уменьшают в четыре раза (увеличивают рас-

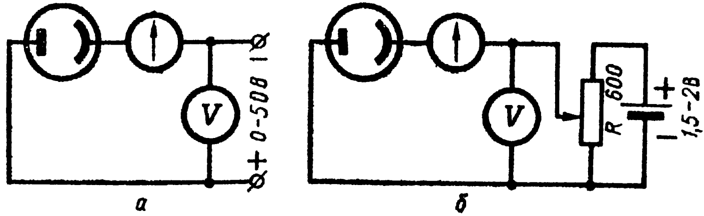


Рис. 2-122. Схемы включения фотоэлемента и измерительных приборов в электрическую цепь.

стояние между фотоэлементом и лампой в два раза). Замечают по гальванометру, что при этом ток уменьшается в четыре раза.

Следовательно, сила тока, определяемая числом вылетающих в единицу времени электронов, прямо пропорциональна падающему световому потоку (закон Столетова).

3. Для иллюстрации основных выводов, вытекающих из уравнения Эйнштейна, включают фотоэлемент в электрическую цепь по схеме, показанной на рисунке 2-122, *б*.

На фотоэлемент подают с потенциометра напряжение обратной полярности. Это напряжение контролируют демонстрационным вольтметром, который включают с заранее подобранным дополнительным сопротивлением такой величины, чтобы стрелка отклонялась на всю шкалу при напряжении 1,5 В. Демонстрационный гальванометр включают совместно с усилителем постоянного тока.

Подготавливая установку к проведению опыта, вставляют в проекционный аппарат конденсор и диапозитивную рамку с оранжевым светофильтром; ползунок потенциометра перемещают в такое положение, при котором снимаемое с потенциометра напряжение равно нулю; фотоэлемент затемняют и устанавливают стрелку гальванометра на нуль.

Затем фотоэлемент освещают оранжевым светом. Гальванометр обнаруживает ток. С помощью потенциометра увеличивают постепенно разность потенциалов. Ток постепенно убывает до нуля. Это доказывает, что электроны вылетают с катода с различными скоростями и в момент прекращения тока они не имеют достаточной энергии, чтобы преодолеть тормозящее поле. Очевидно, в этом случае можно написать равенство

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_0,$$

где e — заряд электрона, m — масса электрона, U_0 — тормозящее напряжение, $v_{\max}$ — максимальная скорость электронов.

Обращают внимание учащихся на то, что из приведенного выше уравнения можно найти максимальную скорость вылета электронов, соответствующую данной частоте света.

Затем пучок света от лампы перекрывают поочередно зеленым и синим светофильтрами. Замечают, что для прекращения тока приходится все время увеличивать тормозящую разность потенциалов.

Наконец, при постоянной частоте света изменяют величину светового потока, падающего на фотоэлемент. Устанавливают, что тормозящее напряжение не зависит от величины светового потока. Из описанных опытов следуют важные выводы, подтверждающие уравнение Эйнштейна: 1) максимальная скорость электронов, а следовательно, и их кинетическая энергия увеличиваются с возрастанием частоты падающего света; 2) скорость электронов не зависит от величины светового потока.

Далее демонстрируют цветной учебный кинофильм «Фотоэффект» [1].

Начинается фильм демонстрацией опыта Герца (разряд электрометра под действием света). Затем показывается установка опыта Столетова для исследования явления фотоэффекта. Подробно объясняется процесс выбивания электронов из металла фотонами, а также действие на электроны электрического поля.

Далее демонстрируется зависимость силы фототока от освещенности и частоты света. Показывается опыт по обнаружению длинноволновой границы фотоэффекта и объясняется зависимость скорости фотоэлектронов от частоты света.

ОПЫТ 114. УСТРОЙСТВО И ДЕЙСТВИЕ ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

Оборудование: 1) фотоэлемент СЦВ-4 на подставке, 2) гальванометр демонстрационный от амперметра, 3) усилитель к гальванометру, 4) вольтметр демонстрационный, 5) выпрямитель универсальный ВУП, 6) лампа накаливания электрическая на подставке, 7) провода соединительные с наконечниками, 8) учебные «Таблицы по физике для X класса».

Вначале объясняют устройство фотоэлемента по учебной таблице.

По внешнему виду вакуумные и газонаполненные фотоэлементы отличаются друг от друга формой баллона и расположением выводов (рис. 2-123).

У фотоэлементов типа ЦГ (цезиевый, газонаполненный) и ЦВ (цезиевый, вакуумный) анод имеет форму колечка, расположенного в середине баллона. У фотоэлементов типа СЦВ-5 (сурмяно-цезиевый, вакуумный) анод расположен в нижней части баллона, благодаря чему тень от него не падает на рабочую поверхность катода.

Светочувствительный слой катода нанесен на серебряную подложку, которая покрывает баллон с внутренней стороны. Часть баллона свободна от покрытия и образует окошечко для света. Активный слой катода покрыт щелочными или щелочноземельными металлами.

Катоды наиболее распространенных фотоэлементов делают кислородно-цезиевыми и сурьмяно-цезиевыми.

У вакуумного фотоэлемента воздух из баллона полностью удален. В газонаполненных фотоэлементах баллон после удаления воздуха заполняется аргоном при давлении 2,7—5,3 Н/м^2.

После рассмотрения устройства демонстрируют действие фотоэлемента.

Приборы включают в электрическую цепь сначала по схеме, изображенной на рисунке 2-122, *а*. Гальванометр берут с усилителем постоянного тока. Регулируемое постоянное напряжение

[1] Фотоэффект. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1963, 1 ч., цветной. Продолжительность демонстрации — 10 мин.

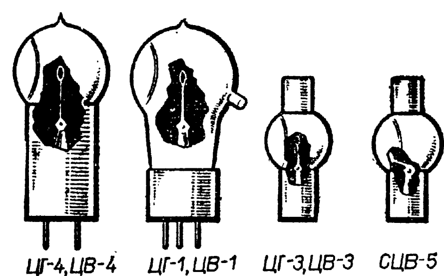


Рис. 2-123. Внешний вид и устройство вакуумных и газонаполненных фотоэлементов.

получают от универсального выпрямителя (зажимы 0±±100) и контролируют демонстрационным вольтметром.

Фотоэлемент закрывают от постороннего света черной бумагой, на его электроды подают напряжение 10—15 В и устанавливают стрелку гальванометра на нуль шкалы. Освещают катод фотоэлемента и наблюдают появление тока в цепи. Выключают лампу — ток прекращается. Опыт повторяют несколько раз.

Прохождение тока внутри вакуумного фотоэлемента объясняют движением от катода к аноду электронов, вырванных светом.

Изменяют полярность включения фотоэлемента. Отмечают отсутствие тока в цепи.

Снова изменяют полярность включения фотоэлемента и показывают зависимость фототока от освещенности, а затем — зависимость фототока от напряжения, подаваемого на фотоэлемент (при постоянной освещенности). В заключение обращают внимание учащихся на вольт-амперные и спектральные характеристики фотоэлемента.

У вакуумного фотоэлемента вольт-амперная характеристика подобна характеристике диода (рис. 2-124, *б*, второй график). Она имеет прямолинейный участок, в пределах которого фототок прямо пропорционален приложенному напряжению. Это позволяет применять вакуумные фотоэлементы для оптической записи и воспроизведения звука.

Вольт-амперная характеристика газонаполненного фотоэлемента имеет вид параболической кривой, характерной для газового разряда (рис. 2-124, *а*, первый график).

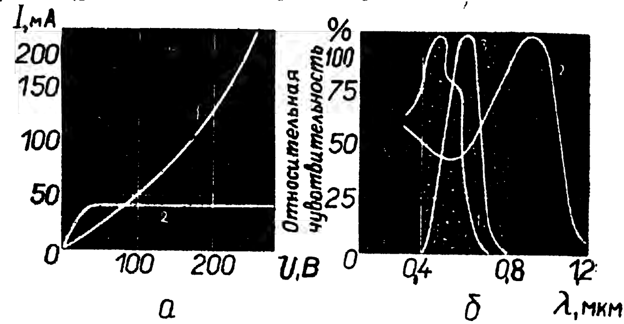


Рис. 2-124. Характеристики фотоэлементов:

а — вольт-амперные (*1* — газонаполненного; *2* — вакуумного); *б* — спектральные (*1* и *2* — фотоэлементов; *3* — глаза).

Из рассмотрения спектральных характеристик делают вывод, что фотоэлементы способны реагировать не только на видимый свет, но и на инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, не воспринимаемые глазом.

ОПЫТ 115. ФОТОРЕЛЕ С ГАЗОНАПОЛНЕННЫМ ФОТОЭЛЕМЕНТОМ

Оборудование: 1) реле электронное универсальное с фотоэлементом ЦГ-3, 2) выпрямитель универсальный ВУП, 3) лампа накаливания электрическая на подставке, 4) фонарь электрический, карманный, 5) провода соединительные с наконечниками, 6) кинофильм «Фотоэлементы и их применение», 7) кинопроектор.

Небольшие токи (микроамперы), получаемые от фотоэлементов с внешним фотоэффектом, недостаточны для срабатывания электромагнитного реле, непосредственно включенного в цепь фотоэлемента. Поэтому электромагнитное реле приходится включать через усилитель. В качестве такого усилителя можно взять универсальное электронное реле.

На панели электронного реле устанавливают газонаполненный фотоэлемент ЦГ-3. При этом анод фотоэлемента соединяют с верхним левым зажимом, а катод — с зажимом, соединенным с сеткой лампы (рис. 2-125). Подвижный контакт переменного резистора, включенного между сеткой и катодом лампы, устанавливают так, чтобы была введена примерно одна треть его сопротивления.

В исполнительную цепь электромагнитного реле через нормально разомкнутые контакты включают обычную лампу накаливания. Питание фотореле осуществляют от выпрямителя ВУП, а питание исполнительной цепи — от осветительной сети.

Чтобы во время демонстрации общее освещение в классе не создавало помехи, на фотоэлемент надевают защитный колпачок с небольшим окошком.

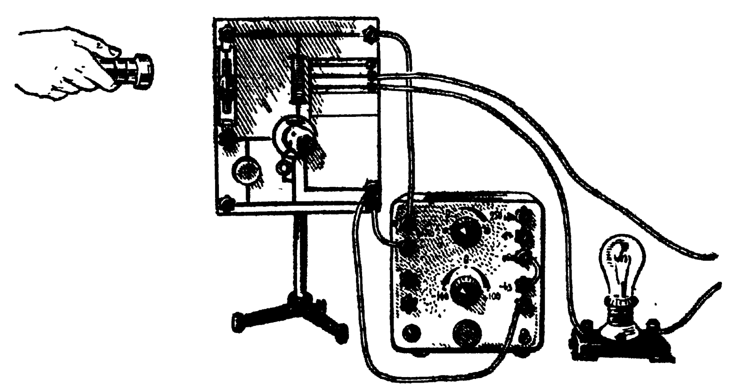


Рис. 2-125. Демонстрация действия фотореле с газонаполненным фотоэлементом.

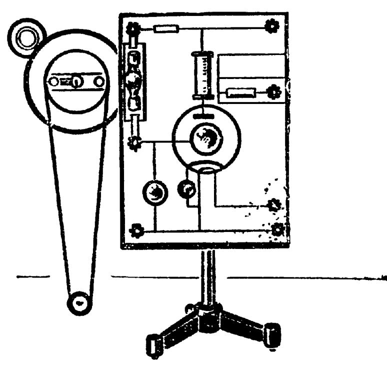


Рис. 2-126. Реле электронное универсальное с приставкой для киноленты.

При неосвещенном фотоэлементе обращают внимание учащихся на то, что якорь электромагнитного реле не притягивается к сердечнику и исполнительная цепь разомкнута. При этом полезно слегка нажать рукой на якорь и показать, что лампа загорается, если исполнительную цепь замкнуть. При отпускании якоря цепь размыкается и лампа гаснет. Значит, при неосвещенном фотоэлементе ток в анодной цепи отсутствует или его величина недостаточна для срабатывания реле.

Затем освещают фотоэлемент, направив на него пучок света от электрического фонарика. Под действием света возникает эмиссия электронов с фотокатода. В цепи фотоэлемента возникает ток, и на включенной части переменного резистора образуется разность потенциалов. Потенциал сетки электронной лампы повышается. Ток в анодной цепи значительно возрастает. При этом электромагнитное реле срабатывает и включает лампу.

Если убрать фонарик или выключить его, ток в цепи фотоэлемента уменьшается; соответственно понижается потенциал сетки электронной лампы и уменьшается ток в анодной цепи. Якорь под действием пружины отходит от сердечника катушки электромагнитного реле, исполнительная цепь размыкается и лампа гаснет. Затем включают лампу накаливания в цепь нормально замкнутых контактов электромагнитного реле и повторяют опыт. Теперь при затемненном фотоэлементе лампа накаливания горит, а при освещенном — гаснет.

После этого на панели реле устанавливают приставку для воспроизведения звука с киноленты, как показано на рисунке 2-126. На диск приставки надевают кольцо, склеенное из очищенной от эмульсии кинопленки. На кинопленку предварительно наносят черной краской различной длины зачерненные участки, которые вместе с оставшимися прозрачными участками определяют заданную программу действия реле.

К электродвигателю подключают батарею аккумуляторов напряжением 4 В; пленка приходит в движение и лампа в исполнительной цепи то загорается, то гаснет в соответствии с заданной на пленке программой.

С описанным фотореле можно демонстрировать те же опыты, что и с полупроводниковым фотореле (см. ч. 1, гл. 3, опыт 158).

Для более полного ознакомления учащихся с практическими применениями фотореле демонстрируют второй фрагмент из учебного кинофильма «Фотоэлементы и их применение».

В фрагменте показываются следующие применения фотореле: автоматический счет различных изделий готовой продукции, обеспечение безопасности при работе на резальной машине, автоматическое включение и выключение огней на бакенах, контроль прозрачности жидкостей и газов, проверка качества полировки стальных шариков.

ОПЫТ 116. ФОТОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) раствор калия иодида, 3) раствор сульфата железа с метиленовой синькой, 4) фотобумага бромосеребряная, 5) раствор проявителя, 6) светофильтры, 7) экран настольный, 8) кювета прямоугольная и стакан НН-250, 9) кнопки канцелярские.

Фотохимические реакции являются одним из проявлений взаимодействия света и вещества, при котором отчетливо проявляются квантовые свойства света. Для демонстрации таких реакций показывают следующие опыты:

1. В проекционный аппарат с мощным источником света (дуговая лампа или лампа накаливания мощностью 300 Вт) помещают между конденсором и объективом ширму с двойной рамкой для диапозитивов (см. рис. 2-95). Перед объективом на подъемном столике ставят прямоугольную кювету из органического стекла с 50-процентным водным раствором иодида калия. Раствор готовят заранее и хранят в сосуде из темно-желтого стекла. Некоторое количество раствора оставляют для последующего сравнения. Его наливают в стакан и закрывают от света колпаком, склеенным из черной бумаги. Для ускорения фотохимической реакции в обе части раствора перед опытом наливают по 1 мл 10-процентного раствора соляной кислоты. Затем включают лампу осветителя в сеть и в течение нескольких минут наблюдают постепенное изменение цвета раствора (он желтеет).

Учащимся поясняют, что под действием света происходит реакция, в результате в растворе выделяется свободный йод, который и окрашивает раствор:

$$4KI + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4KOH + 2I_2.$$

В реакции принимает участие атмосферный кислород.

Затем при рассеянном свете учащимся показывают для сравнения вторую часть раствора, которая находилась в темноте; она осталась неокрашенной. Далее проводят опыт с прозрачной частью раствора, причем световой пучок от проекционного аппарата перекрывают красным светофильтром. После 2—3 мин облучения раствор рассматривают при рассеянном свете и обнаруживают, что красный свет химического действия не производит.

2. Фотохимическую реакцию можно показать и с раствором сульфата железа и метиленовой синьки, который готовят зара-

нее следующим образом. Берут 10 г сульфата железа и растворяют в 200 мл холодной воды. Чтобы исчезли ионы трехвалентного железа, раствор смешивают с небольшим количеством железного порошка или железных опилок. Далее раствор фильтруют и добавляют в него 1 мл 10-процентного раствора соляной кислоты и немного метиленовой синьки, не содержащей хлористого цинка.

Приготовленный раствор наливают в колбу, плотно закрывают пробкой и вносят в световой пучок проекционного аппарата. Под действием света голубой раствор очень быстро теряет свой цвет, но, будучи потом перенесен в темноту, он почти также быстро приобретает свою первоначальную окраску.

3. На демонстрационном столе рядом с проекционным аппаратом располагают настольный экран. В рамку для диапозитивов вставляют красный и синий светофильтры. При красном свете на экране с помощью канцелярских кнопок укрепляют лист фотобумаги, предварительно смоченной проявителем.

Показывают, что при облучении красным светом фотобумага остается белой, а под действием синего — темнеет. Степень потемнения находится в прямой зависимости от времени облучения.

Учащимся сообщают, что последняя фотохимическая реакция сопровождается разложением галоидного серебра; она получила широкое практическое применение в фотографии.

Фотохимические реакции объясняют на основе квантовых представлений о природе света. Сообщают, что каждый поглощенный квант света вызывает превращение одной молекулы данного вещества. Энергия кванта должна быть достаточна, чтобы вызвать это превращение. В противном случае реакция не происходит и поглощение света приводит лишь к увеличению внутренней энергии тела. Фотохимическая реакция не возникает также и в том случае, если вещество прозрачно для света данной частоты.

Эти сведения позволяют подвести учащихся к пониманию основного закона, которому подчиняются все фотохимические реакции: масса вещества, прореагировавшего в фотохимической реакции, прямо пропорциональна энергии поглощенного света.

ОПЫТ 117. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА С КИНОЛЕНТЫ

Оборудование: 1) реле электронное универсальное с приставкой для воспроизведения звука с киноленты, 2) усилитель низкой частоты, 3) громкоговоритель электродинамический, 4) кинокольцовка с записью речи, 5) батарея аккумуляторов 3-НКН-10, 6) выключатель однополюсный демонстрационный, 7) провода соединительные с наконечниками, 8) штатив универсальный, 9) учебные «Таблицы по физике для X класса».

Перед опытом учащихся кратко знакомят по учебной таблице с принципом оптической записи звука. Основное внимание следует уделить процессу воздействия электрического сигнала на

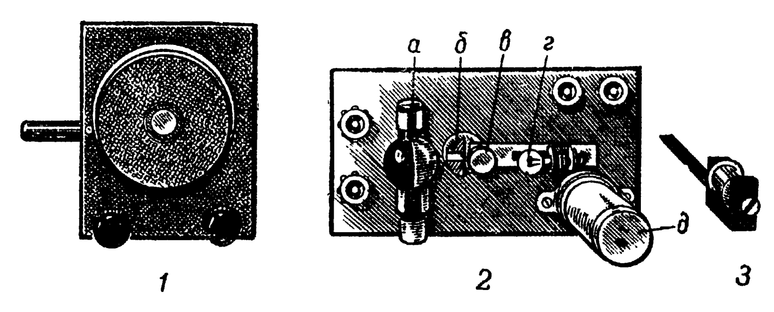


Рис. 2-127. Комплект приборов для воспроизведения звука с киноленты:

1 — лентопротяжный механизм; 2 — фотоэлектрический преобразователь; 3 — натяжной ролик.

световой поток, который фиксируется на фотопленке в виде фонограммы.

Процесс звукозаписи состоит в следующем. На движущуюся с постоянной скоростью фотопленку проецируют изображение узкой щели. Ширина щели непрерывно изменяется в соответствии со звуковым сигналом, который с помощью микрофона преобразуется в электрический, усиливается и подается на шлейф осциллографа.

Воспроизведение звука с киноленты можно демонстрировать с помощью лентопротяжного механизма из комплекта приборов для магнитной записи и воспроизведения звука и фотоэлектрического преобразователя, показанных на рисунке 2-127.

Лентопротяжный механизм *1* представляет собой текстолитовый барабан диаметром 60 мм и толщиной 18 мм, насаженный на ось синхронного электродвигателя, который рассчитан на напряжение 220 В и дает 60 об/мин (электродвигатель укреплен на обратной стороне панели).

Фотоэлектрический преобразователь *2* состоит из газонаполненного фотоэлемента *а* типа ЦГ-3, осветителя *г* (лампы МН 3,5 В; 0,28 А) и цилиндрической линзы *в*, выточенной из плексигласа. Нить накаливания лампочки располагается параллельно оси цилиндрической линзы. Изображение нити проецируется на фонограмму киноленты, которая скользит по направляющему полуцилиндру *б*, имеющему отверстие для прохождения светового пучка.

Напряжение на фотоэлемент подается от заряженного до 200—300 В электролитического конденсатора *д* емкостью 20 мкФ (он вставляется в специальную обойму, расположенную на панели). Для ограничения тока разряда конденсатора в цепь фотоэлемента включают резистор сопротивлением 3,0 МОм. Одного заряда конденсатора достаточно для воспроизведения звука в течение 5—7 мин.

Натяжной ролик *3* может свободно вращаться в металличе-

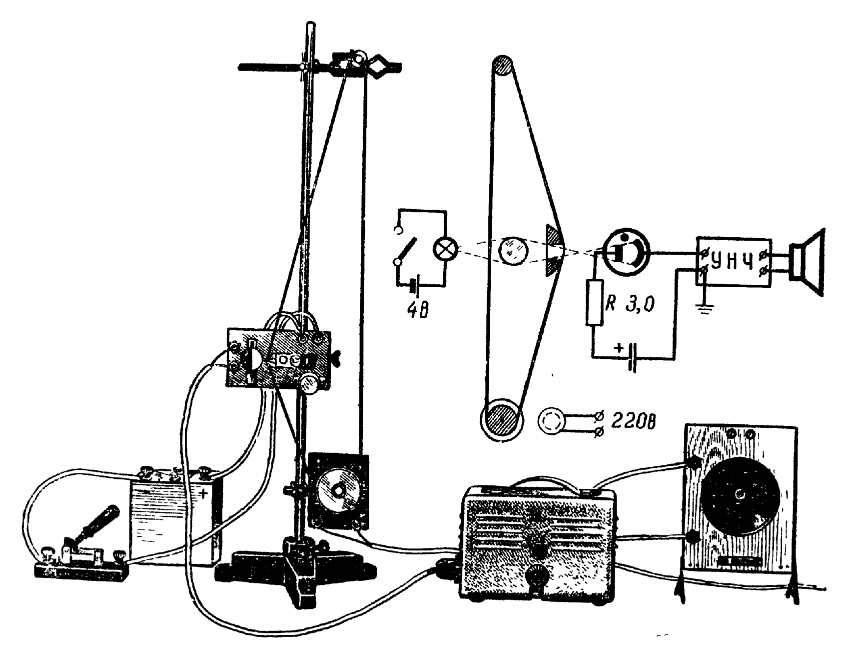


Рис. 2-128. Установка и ее схема для воспроизведения звука с киноленты.

ской скобе. К последней прикреплена упругая пластинка-держатель. Пластинка обеспечивает равномерное натяжение ленты при ее движении.

Для демонстрации опыта собирают установку, показанную на рисунке 2-128. В нижней части стойки универсального штатива укрепляют лентопротяжный механизм, примерно в середине стойки штатива — фотоэлектрический преобразователь, а на верхнем конце — натяжной ролик. На тянущий барабан, натяжной ролик и направляющий полуцилиндр надевают кинокольцовку с записью речи. Выходные зажимы цепи фотоэлемента соединяют экранированным проводом с микрофонным входом усилителя низкой частоты. К выходу усилителя подключают электродинамический громкоговоритель. Осветительную лампу соединяют с батареей аккумуляторов. Конденсатор, питающий цепь фотоэлемента, заряжают от универсального выпрямителя (ВУП) и вставляют в обойму на панели.

Сначала включают электродвигатель и, слегка изменяя положение натяжного ролика, добиваются равномерного движения киноленты. Затем включают усилитель и после прогрева ламп замыкают цепь питания осветительной лампы. В течение 1—2 мин слушают воспроизведение записанного звука.

Процесс воспроизведения звука объясняют по схеме, представленной на рисунке 2-128. Эту схему вычерчивают на классной доске.

Свет от лампы, пройдя цилиндрическую линзу, собирается в узкий пучок и в виде тонкого светлого штриха падает на движущуюся звуковую дорожку киноленты. Фонограмма модулирует световой поток, который далее падает на катод фотоэлемента. В фотоэлементе колебания светового потока преобразуются в электрические колебания, которые после усиления поступают в громкоговоритель.

При пояснении процесса воспроизведения звука, записанного оптическим способом, можно показать пятый фрагмент из учебного кинофильма «Фотоэлементы и их применение».

Воспроизведение звука можно демонстрировать также с помощью универсального электронного реле. В этом случае собирают установку по рисунку 2-129.

На универсальном электронном реле закрепляют приставку с кинокольцовкой. Для этого опорный стержень приставки вставляют в обойму с обратной стороны панели так, чтобы диск был расположен строго в вертикальной плоскости. На бортик диска надевают киноленту матовой стороной внутрь кольца. При этом фонограмма должна выступать за край бортика. На свободный конец петли киноленты помещают натяжной ролик.

К зажимам приставки подключают батарею аккумуляторов, соблюдая полярность.

Чтобы проверить правильность расположения приставки, замыкают на некоторое время цепь выключателем и наблюдают за движением кинокольцовки, которая не должна соскакивать и тормозиться боковой поверхностью диска. В случае необходимости, слегка ослабив винт крепления опорного стержня, поворачивают приставку в нужном направлении. Регулировочным винтом с натяжной пружиной устанавливают нормальную скорость вращения диска.

На лицевой стороне панели универсального электронного реле устанавливают фотоэлемент между зажимами *4* и *5*. Переставную шторку располагают в верхнем положении, чтобы три вывода от

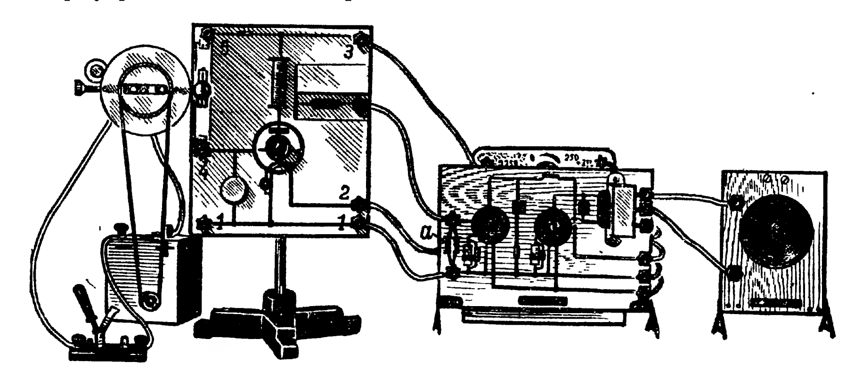


Рис. 2-129. Установка для воспроизведения звука с киноленты с помощью универсального электронного реле.

контактных пластин электромагнитного реле оказались закрытыми. Переменный резистор вводят полностью. Выход электронного реле, выполняющего роль предварительного однолампового усилителя, соединяют со входом усилителя низкой частоты из радиотехнического набора, а к выходу усилителя подключают громкоговоритель.

Для согласования выхода универсального электронного реле со входом усилителя и получения неискаженного воспроизведения звука включают между входными зажимами усилителя дополнительно сопротивление *a* порядка 2—3 кОм.

Электронное реле и усилитель питают от универсального выпрямителя.

Воспроизведение звука с киноленты можно демонстрировать также с помощью школьного киноаппарата.

ОПЫТ 118. СВЕТОВОЙ ТЕЛЕФОН

Оборудование: 1) реле электронное универсальное с фотоэлементом, 2) усилитель низкой частоты из радиотехнического набора; 3) усилитель низкой частоты, 4) микрофон электродинамический или телефонная трубка, 5) громкоговоритель электродинамический, 6) выпрямитель универсальный ВУП, 7) лампа накаливания на подставке, 8) линза выпуклая на подставке, 9) провода соединительные с наконечниками, 10) батарея аккумуляторов 3-НКН-10.

Для демонстрации опыта размещают на одном конце демонстрационного стола передающую установку, а на другом — приемную (рис. 2-130). Передающая установка представляет усилитель низкой частоты, на вход которого включен микрофон, а на выход — электрическая лампа на напряжение 3,5 В, укрепленная на некоторой высоте в лапке штатива. Против лампы располагают на подставке собирающую линзу с фокусным расстоянием 10—15 см.

Приемное устройство представляет собой установку, идентичную той, которую собирают на базе универсального электронного реле.

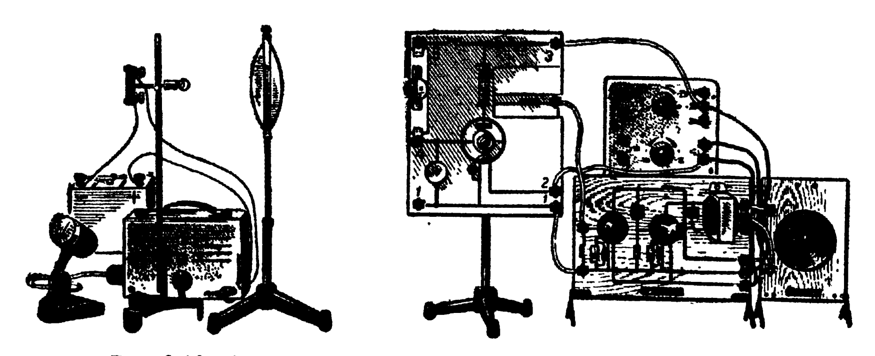


Рис. 2-130. Установка для демонстрации светового телефона.

После того как сделаны все соединения, уточняют положение линзы. Она должна быть расположена на таком расстоянии от лампы, чтобы увеличенное изображение нити проецировалось на катод фотоэлемента, закрепленного на универсальном электронном реле. Установку линзы производят при горящей лампе, к которой необходимое напряжение подводится от универсального полупроводникового выпрямителя. После подбора положения линзы лампу снова подключают к выходу усилителя.

При воздействии на микрофон звука лампа загорается, причем накал нити, а следовательно, и ее световой поток изменяются в соответствии с громкостью и частотой звука. Световые колебания звуковой частоты преобразуются фотоэлементом приемной установки в слабые электрические колебания, которые далее усиливаются и воспроизводятся громкоговорителем.

Для устранения удвоения частоты звука и обеспечения его неискаженного воспроизведения в цепь вторичной обмотки выходного трансформатора необходимо последовательно с лампой включить источник постоянного напряжения на 1,5—2 В (при отсутствии сигнала лампа должна светить слабо).

Опыт не требует затемнения. Вместо универсального электронного реле и усилителя низкой частоты можно взять усилитель, например, от школьной звуковой киноустановки.

ОПЫТ 119. ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОТ ЧАСТОТЫ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО СВЕТА

Оборудование: 1) аппарат проекционный с электрической дугой, 2) набор по флюоресценции, 3) набор по фосфоресценции, 4) экран флюоресцирующий, 5) призма дисперсионная «Флинт» или призма прямого зрения, 6) экран настольный, 7) лампа люминесцентная, 8) кинофильм «Люминесценция», 9) кинопроектор.

Собирают установку для получения сплошного спектра электрической дуги по рисунку 2-52.

Спектр проецируют на черную поверхность настольного экрана и в различные участки спектра вносят трубки, наполненные спиртовым раствором флюоресцина, эозина и родамина. Трубки располагают вдоль спектра, чтобы все они освещались одновременно одним и тем же участком спектра (рис. 2-131).

Обращают внимание учащихся на то, что на участке от красной до желтой области ни одна из жидкостей не флюоресцирует; в зеленой области возникает желто-оранжевое свечение у эозина, в голубой и синей — свечение наблюдается у всех жидкостей. Зеленоватое свечение флюоресцина обнаруживается и в фиолетовой части спектра.

Опыт повторяют с набором по фосфоресценции. Бумажные полоски, покрытые люминофорами, вносят на несколько секунд в красную часть спектра и, рассматривая их после этого в темноте, убеждаются, что красное и инфракрасное излучение фосфоре-

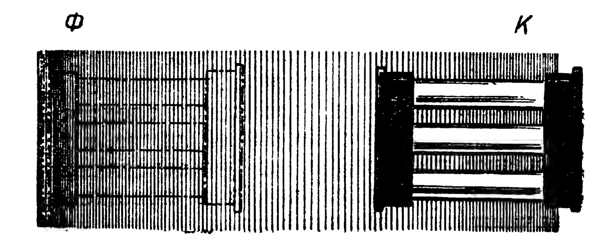


Рис. 2-131. Расположение трубок с флюоресцирующими жидкостями в сплошном спектре.

сценции не вызывает. Затем люминофоры вносят в середину спектра; в зеленой части спектра хорошо возбуждается люминофор, фосфоресцирующий красным цветом. Это свечение настолько яркое, что оно заметно еще во время нахождения люминофора в спектре.

Третий раз вносят люминофоры в сине-фиолетовую часть спектра. Обнаруживают, что зеленый люминофор лучше всего возбуждается синим светом, а голубой — фиолетовым.

Наконец, в спектр вносят флюоресцирующий экран и замечают на нем положение спектральных цветов. Когда экран переносят в темноту, учащиеся сразу видят его неравномерное свечение.

На основе описанных опытов формулируют вывод, что длина световых волн, испускаемых люминесцирующим веществом, больше длин волн возбуждающего света, т. е. спектр люминесценции сдвинут по отношению к спектру поглощения в сторону длинных волн (правило Стокса).

Люминесцирующее вещество является своеобразным трансформатором частоты света, причем одно и то же вещество, возбужденное светом различной частоты, дает один и тот же спектр излучения, характерный для данного люминесцирующего вещества. Спектр люминесценции характеризует вещество и не зависит от способа возбуждения.

Яркость люминесценции зависит от рода вещества и условий возбуждения. Яркость тем больше, чем меньше разность между длинами волн (частотами) света люминесценции и возбуждающего света. Последнее особенно отчетливо наблюдается в опыте с флюоресцирующим экраном.

Существование порога люминесценции подтверждает квантовую природу света.

На основе квантовых представлений разъясняют механизм явления люминесценции. С этой целью демонстрируют цветной учебный кинофильм «Люминесценция» [1] (первый фрагмент), где показывается, как при поглощении фотона атомы или молекулы возбуждаются, а затем самопроизвольно испускают новые фотоны меньшей энергии; часть энергии поглощенных фотонов идет

---

[1] Люминесценция. Ленинградская студия научно-популярных фильмов, 1969, 1 ч. (2 фрагм.), цветной. Продолжительность демонстрации — 10 мин.

на увеличение внутренней энергии тела. Поэтому частота света люминесценции меньше частоты возбуждающего излучения.

Из разнообразных применений явления люминесценции в науке и технике (светящиеся экраны в рентгеноскопии, в осциллографии, телевидении и радиолокации; люминесцентные лампы; люминесцентный анализ), показываемых во втором фрагменте кинофильма, подробно рассматривают устройство и принцип действия люминесцентной лампы (опыт 98), в которой ультрафиолетовое излучение паров ртути преобразуется люминофорами в видимый свет.

ОПЫТ 120. ЗАВИСИМОСТЬ ФОСФОРЕСЦЕНЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Оборудование: 1) аппарат проекционный, 2) экран флюоресцирующий, 3) диск металлический или брусок, 4) плитка электрическая или газовая горелка, 5) лед или снег.

К обратной стороне флюоресцирующего экрана прижимают слегка нагретое тело, например металлический диск. Когда экран прогреется, его вносят в световой пучок от проекционного аппарата, а затем в темноте наблюдают свечение. Прогретая область экрана фосфоресцирует очень слабо и контрастно выделяется в виде темного пятна на фоне остальной ярко светящейся части (рис. 2-132, *а*). Форма пятна соответствует форме тела, которым прогревался экран.

Затем к обратной стороне экрана прижимают металлический диск, предварительно охлажденный льдом или снегом, и, подождав немного, вновь возбуждают свечение экрана. Теперь охлажденная область светится ярче и дольше, чем остальная его часть (рис. 2-132, *б*). Учащиеся убеждаются в том, что повышение температуры фосфоресцирующего вещества уменьшает, а понижение увеличивает яркость и длительность люминесценции.

Можно отметить, что многие вещества (например, парафин, яичная скорлупа и др.), не люминесцирующие при обычной температуре, начинают люминесцировать при сильном охлаждении (при температуре жидкого воздуха). Наоборот, при температуре

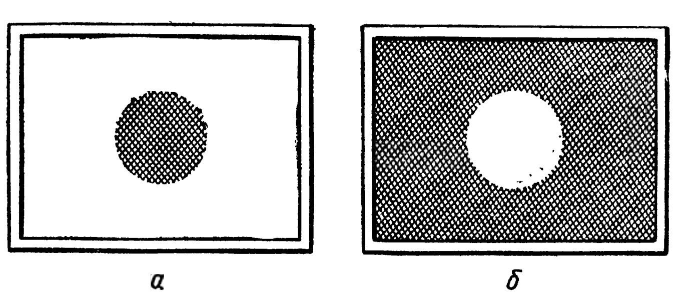


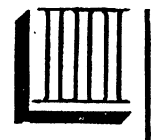
Рис. 2-132. Фосфоресценция экрана:
а — при нагревании; *б* — при охлаждении металлическим диском.

выше 500° С большинство люминесцирующих веществ теряет способность люминесцировать.

К предварительно засвеченному флюоресцирующему экрану с обратной стороны прижимают в темноте слегка нагретый металлический диск. Экран в этом месте ярко вспыхивает, отчетливо передавая контуры прижатого тела, а через несколько секунд вспышка гаснет, в то время как остальная область экрана, имеющая пониженную температуру, продолжает еще фосфоресцировать.

Из опыта следует, что с повышением температуры время высвечивания энергии, запасенной люминофором, уменьшается. С понижением же температуры, наоборот, время излучения увеличивается. При этом, как показывают точные измерения, общее количество излучаемой энергии остается постоянным.

Учащимся сообщают, что при достаточно сильном охлаждении фосфоресценция может быть прекращена совсем. В этом случае накопленная световая энергия может сохраняться в люминофоре неограниченное время. Высвечивание энергии можно вызвать нагреванием, инфракрасными лучами, электрическим или магнитным переменным полем.



ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

Особенность содержания раздела «Физика атома и атомного ядра» не позволяет показать в школе многие опыты по атомной физике. Нельзя показать также различные установки и механизмы, применяемые в ядерной физике. Поэтому особое значение приобретают демонстрации различных моделей, кинофильмов, диапозитивов и таблиц, частично компенсирующих недостаток эксперимента.

§ 1. СТРОЕНИЕ АТОМА

ОПЫТ 121. МОДЕЛЬ ОПЫТА РЕЗЕРФОРДА

Оборудование: 1) машина электрофорная или преобразователь высоковольтный «Разряд-1», 2) бюретка обыкновенная с краном, 3) шар металлический полый диаметром 50 мм от электрометра, 4) штатив изолирующий, 5) штатив лабораторный, 6) фотокювета, 7) провода соединительные с наконечниками, 8) осветитель для теневого проецирования и подсвета, 9) экран проекционный.

Модель атома Резерфорда по рассеянию альфа-частиц ядрами атомов демонстрируют в теневой проекции. Для этого собирают установку по рисунку 3-1. В бюретку, укрепленную вертикально в лапке штатива, вставляют конец провода, соединенного с кондуктором электрофорной машины.

Около нижнего конца бюретки устанавливают на изолирующем штативе малый шар от электрометра. Шар соединяют с тем же кондуктором электрофорной машины, что и провод, идущий к бюретке. Положение бюретки регулируют так, чтобы ее нижний конец находился над шаром на расстоянии 5—6 см, а вертикаль, проходящая через конец бюретки, отстояла от шарика на 1—1,5 см. В бюретку наливают воду, открывают кран так, чтобы вода вытекала мелкими каплями в подставленную на столе кювету.

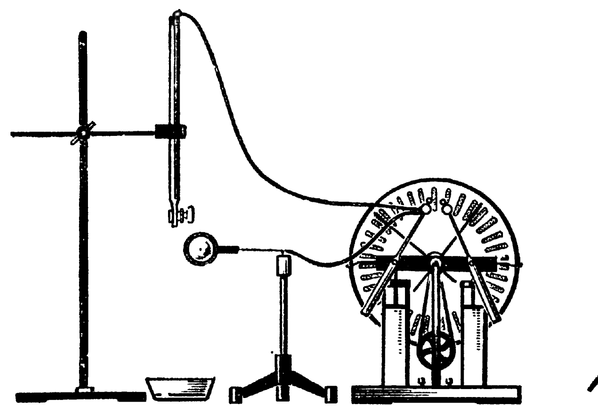


Рис. 3-1. Установка для теневой проекции модели опыта Резерфорда.

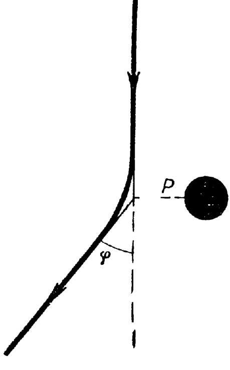


Рис. 3-2. Траектория капли в электрическом поле заряженного шара.

Наблюдение за падением капель производят с помощью теневой проекции. Сначала на экране наблюдают вертикальное падение незаряженных капель. Затем шар и воду в бюретке заряжают положительным зарядом от электрофорной машины. Наблюдают движение заряженных капель в электрическом поле заряженного шара. Замечают, что траектории падения капель искривляются.

Учащимся поясняют, что шар в опыте моделирует ядро атома, а заряженные капли воды — альфа-частицы.

Угол рассеяния φ капель зависит от их прицельного расстояния *p*, т. е. расстояния от центра шара до прямой, вдоль которой первоначально падают капли (рис. 3-2).

Показывают эту зависимость. Убеждаются, что при уменьшении прицельного расстояния угол рассеяния увеличивается и наоборот.

122. ФРАГМЕНТ «ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА» ИЗ КИНОФИЛЬМА «АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО»

Оборудование: 1) кинофильм «Атом и атомное ядро» (3-й фрагмент), 2) кинопроектор, 3) альбом «Физика атомного ядра», 4) экран проекционный.

Кинофрагмент «Опыт Резерфорда» из кинофильма «Атом и атомное ядро»[1] показывают на уроке при изучении строения атома.

В этом фрагменте при помощи мультипликации разъясняет-

[1] Атом и атомное ядро. Ленинградская киностудия научно-популярных фильмов, 1966, 6 черно-белых фрагментов и один цветной. Продолжительность демонстрации — 40 мин.

ся опыт Резерфорда и показывается его установка. На основе результатов опыта делается вывод о наличии в атоме ядра, в котором сконцентрирована почти вся масса и весь положительный заряд атома.

Затем показывается планетарная модель атома водорода, непосредственно вытекающая из опытов Резерфорда. Вначале у электрона показывается траектория движения; затем движение электрона ускоряется и траектория его становится размытой: электрон принимает вид облака, окружающего ядро.

В конце фрагмента показываются модели атомов гелия, углерода и менделевия. (Демонстрация фрагмента занимает 4 мин.)

После этого из альбома «Физика атомного ядра» [1] показывают фотографии рассеяния альфа-частиц ядрами хлора и фтора. Фотографии сделаны с камеры Вильсона. Обращают внимание на расположение треков альфа-частиц и ядер отдачи: они определяются законом сохранения импульса.

ОПЫТ 123. ДИСКРЕТНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ АТОМА

Оборудование: 1) тиратрон тлеющего разряда типа ТГ-1-0,1-1,3 на подставке, 2) генератор звуковой школьный, 3) осциллограф электронный ОЭШ, 4) выпрямитель универсальный ВУП, 5) резистор переменный сопротивлением 0,5 МОм на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками.

Как известно, прямым доказательством дискретности энергетических состояний электронов в атоме являются опыты Франка и Герца. Подобный опыт в школьных условиях можно показать с тиратроном тлеющего разряда типа ТГ-1-0,1-1,3 с ксеноновым наполнением. Схема включения тиратрона показана на рисунке 3-3. Напряжение 6,3 В на нить накала тиратрона подают от универсального выпрямителя ВУП. К зажимам сетка — катод подводят регулируемое переменное напряжение от звукового генератора частотой 2—3 кГц. Сетку и анод соединяют через нагрузочный резистор сопротивлением 0,5 МОм. В результате этого между катодом и сеткой тиратрона в течение полупериода возникает ускоряющее поле, а между сеткой и анодом — тормозящее поле.

Напряжение, которое возникает на нагрузочном резисторе за счет анодного тока, подают на вход *У* осциллографа. При этом генератор развертки осциллографа выключают. Развертка производится синусоидальным напряжением, подаваемым на вход *X* от звукового генератора. После включения установки электронный луч осциллографа одновременно развертывается по вертикали в соответствии с изменением силы тока в тиратроне и по горизонтали в соответствии с изменениями напряжения питания. На экране получается график зависимости силы тока от напряжения, т. е. вольт-амперная характеристика тиратрона.

---
[1] Родина Н. А. Физика атомного ядра. Под ред. А. В. Кустовой. М., 1976.

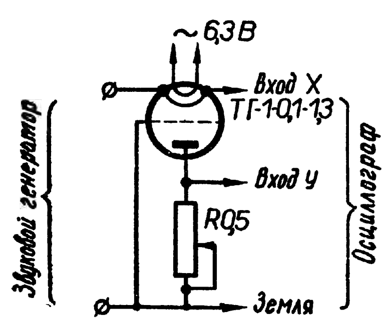


Рис. 3-3. Схема включения приборов для снятия вольт-амперной характеристики тиратрона.

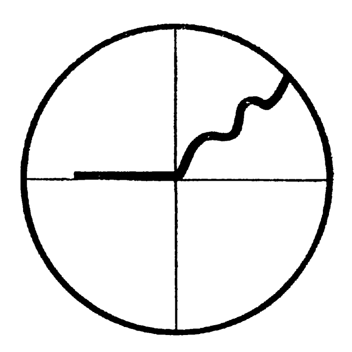


Рис. 3-4. График зависимости анодного тока тиратрона от напряжения на сетке.

Регулируя выходное напряжение звукового генератора и величину нагрузочного сопротивления, а также пользуясь соответствующим управлением осциллографа, получают осциллограмму, изображенную на рисунке 3-4.

Наличие спадов тока на осциллограмме объясняют неупругими столкновениями электронов с атомами газа. В результате таких столкновений электроны передают свою энергию атомам газа и не могут преодолеть тормозящее поле, существующее между сеткой и анодом тиратрона. Так как спады тока соответствуют строго определенным напряжениям на сетке, то из этого делают вывод, что атомы способны принимать от электронов лишь строго определенные количества энергии, необходимые для перевода атома из одного энергетического состояния в другое. Опыт убеждает учащихся в существовании системы дискретных уровней энергии атома.

При наблюдении осциллограммы заметно некоторое раздвоение графика. Устранить его полностью трудно. Чтобы сделать его менее заметным, следует слегка расфокусировать луч.

124. ФРАГМЕНТ «ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМОМ» ИЗ КИНОФИЛЬМА «АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО»

Оборудование: 1) кинофильм «Атом и атомное ядро» (4-й фрагмент «Излучение и поглощение энергии атомом»), 2) кинопроектор, 3) экран проекционный.

Четвертый фрагмент из кинофильма «Атом и атомное ядро» демонстрируют при изучении квантовых постулатов Н. Бора и линейчатых спектров.

В начале фрагмента показывается движение электрона вокруг ядра. Разъясняется, почему такая модель атома совершенно неспособна объяснить факт существования атома и его устойчивость. Движение электрона вокруг ядра по замкнутой орбите про-

исходит с очень большим ускорением. По законам электродинамики ускоренно движущийся электрон должен излучать электромагнитные волны. Частота этих волн равна числу оборотов электрона вокруг ядра в секунду. Излучение электромагнитных волн должно привести к уменьшению энергии электрона и его падению на ядро, т. е. разрушению атома. В действительности этого не происходит: атомы веществ устойчивы. Устойчивость атома объясняется на основе постулатов Бора, которые сформулированы следующим образом:

Постулат первый. «Электроны могут обращаться вокруг ядра только по определенным, разрешенным орбитам».

Постулат второй. «При вращении электрона по одной из возможных орбит атом не излучает энергии».

Постулат третий. «Излучение кванта света происходит только в момент перехода электрона на более близкую к ядру орбиту».

При помощи мультипликации объясняется процесс излучения и поглощения электромагнитных волн атомом. Объясняются линейчатые спектры водорода и других газов.

В конце фрагмента показывается свечение разреженных газов в рекламных трубках. (Продолжительность демонстрации фрагмента 5 мин.)

§ 2. СПОСОБЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ОПЫТ 125. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Оборудование: 1) источник радиоактивных излучений, 2) электрометры с двумя дисками — 2 шт., 3) палочка эбонитовая с мехом, 4) штатив универсальный, 5) провода соединительные с наконечниками.

Для демонстрации опыта берут два одинаковых стрелочных электрометра; на стержень одного из них надевают металлический диск диаметром 10 см. На высоте 4—5 см от диска укрепляют в лапке штатива второй диск такого же размера (рис. 3-5) [1]. Верхний диск соединяют проводником с корпусами обоих электрометров и заземляют. Получают простейшую ионизационную камеру, представляющую собой плоский конденсатор, соединенный с электрометром.

В конденсатор вносят радиоактивный препарат от спинтарископа, располагая его в середине нижнего диска. Оба электрометра заряжают с помощью наэлектризованной палочки так, чтобы их стрелки отклонились на одинаковые углы.

Учащимся сообщают, что под действием радиоактивного излучения происходит ионизация воздуха, находящегося между пластинами конденсатора. Ионизация происходит главным образом под действием альфа-частиц. Образующиеся ионы, двигаясь

[1] Диски входят в комплект электрометров.

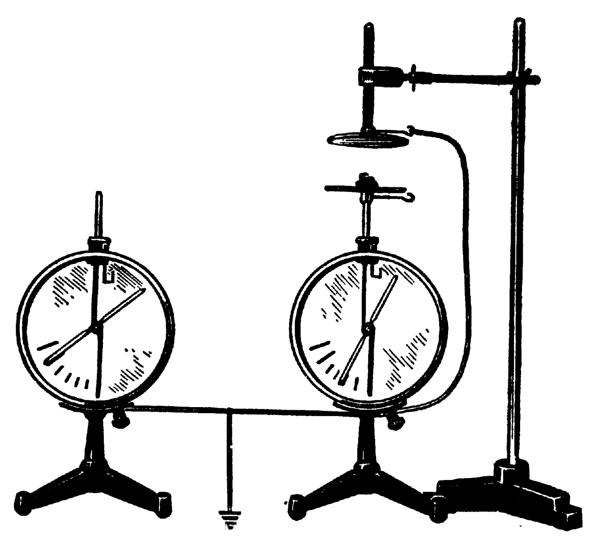


Рис. 3-5. Демонстрация ионизирующего действия радиоактивного излучения.

в электрическом поле, создают электрический ток, за счет которого конденсатор постепенно разряжается. Скорость разряда относительно невелика; стрелка электрометра перемещается на одно деление шкалы примерно за 23 мин. За то же время угол отклонения стрелки у второго (контрольного) электрометра практически не изменяется.

Опыт повторяют с радиоактивным препаратом, приготовленным, например, из солей калия и, сравнивая скорость разряда электрометра в первом и во втором случаях, делают заключение об относительной активности применяемых источников.

Учащимся сообщают, что многие методы обнаружения и измерения активности радиоактивных препаратов основаны на ионизирующем действии излучения.

После демонстрации опыта радиоактивные препараты следует сразу же убрать на место.

В этом и последующих опытах в качестве источников радиоактивных излучений можно брать также светящиеся шкалы и стрелки приборов, соли калия (карбонат калия K_2CO_3 и хлорид калия KCl), золу растений. 1 г K_2CO_3 испускает около 16 β-частиц и примерно 2 γ-кванта в 1 с, а 1 г KCl — примерно 14 β-частиц и около 2 γ-кванта в 1 с. Источник β-излучения можно приготовить из 300 мг высушенного, химически чистого хлорида калия, положив его ровным слоем на алюминиевую тарелочку площадью 2,5 см^2. Такой источник имеет активность примерно 250 β-распадов в минуту, а с учетом поглощения части β-частиц в самом препарате — примерно 160 β-распадов в минуту.

ОПЫТ 126. НАБЛЮДЕНИЕ ТРЕКОВ В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА

Оборудование: 1) камера для наблюдения альфа-частиц демонстрационная, 2) аппарат проекционный, 3) колба круглодонная емкостью 1 л с резиновой грушей, 4) штатив универсальный, 5) спирт, 6) спички.

Перед демонстрацией опыта учащихся кратко знакомят с устройством школьной камеры для наблюдения альфа-частиц (рис. 3-6). Камера представляет собой пластмассовое кольцо, плотно закрытое сверху и снизу пластинками из органического стекла. На боковой поверхности камеры имеется патрубок для присоединения резиновой груши. Внутри камеры находятся радиоактивный препарат и металлическая кольцеобразная диафрагма, имеющая ряд щелевых отверстий. С последней соприкасается гофрированная диафрагма, которая является боковой стенкой рабочего пространства камеры и служит для устранения вихревых движений воздуха.

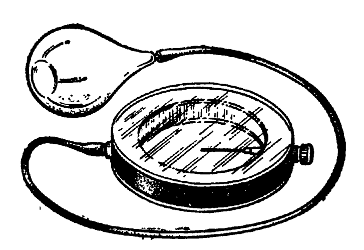


Рис. 3-6. Камера для наблюдения заряженных частиц.

Действие камеры основано на конденсации пересыщенных паров этилового спирта вокруг ионов, которые образуются в газах при прохождении через них альфа-частиц. Охлаждение паров, необходимое для создания пересыщенного состояния, достигается в результате их адиабатного расширения при помощи резиновой груши. При определенной скорости расширения газа конденсация содержащихся в нем паров происходит только на ионах. При этом след каждой альфа-частицы отмечается появлением полоски тумана (трека).

1. Конденсация водяного пара на частицах

Этот опыт является предварительной демонстрацией, раскрывающей принцип действия камеры Вильсона.

Стеклянную колбу споласкивают водой и укрепляют вверх дном в лапке штатива (рис. 3-7). Отверстие колбы закрывают резиновой проб-

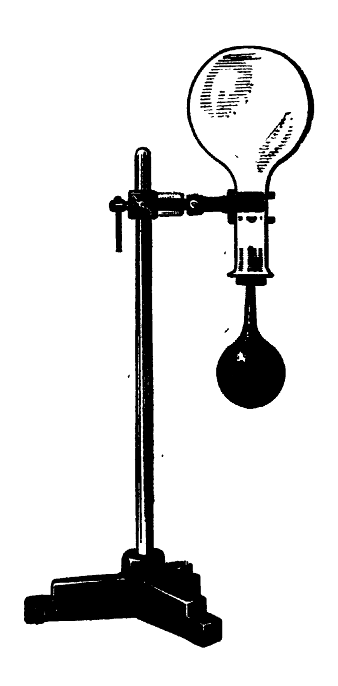


Рис. 3-7. Колба с резиновой грушей для демонстрации конденсации пара на заряженных частицах.

кой, в которую вставляют резиновую грушу. Сначала грушу медленно сжимают, а затем быстро отпускают. При расширении воздуха существенных изменений в колбе не наблюдается (в демонстрации применяют подсвет). После этого колбу открывают и к ее отверстию подносят пламя от спички. Снова закрывают колбу и повторяют опыт. Теперь при расширении воздуха колба наполняется густым туманом: насыщающий водяной пар переходит в перенасыщенный и конденсируется на частицах копоти и ионах, введенных в колбу пламенем спички.

Опыт убеждает учащихся в том, что частицы могут быть центрами конденсации пара.

2. *Наблюдение следов альфа-частиц*

Камеру для наблюдения альфа-частиц устанавливают на проекционном аппарате с приспособлением для горизонтального проецирования (рис. 3-8). Поверхность органического стекла (крышку камеры) натирают суконкой или мехом, создавая тем самым в камере электрическое поле.

Включают проекционную лампу и, передвигая объектив, добиваются на экране четкого изображения шарика с радиоактивным препаратом.

В резиновую грушу набирают 2—3 капли спирта-ректификата и присоединяют ее с помощью резиновой трубки к камере.

Сосредоточив внимание учащихся на изображении радиоактивного препарата на экране, медленно сжимают грушу, а за-

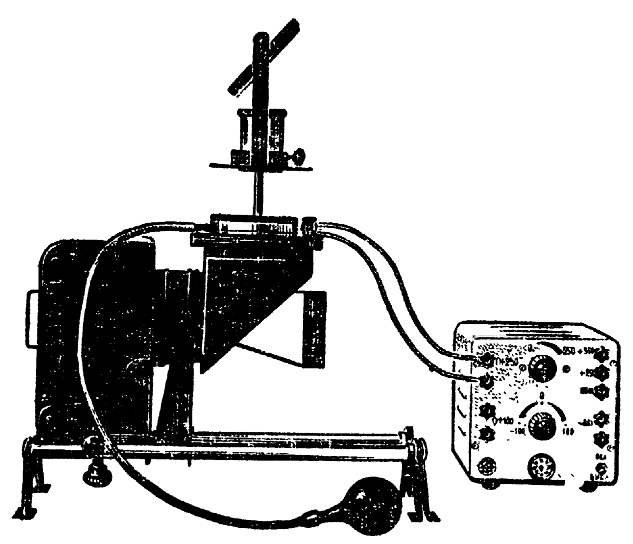


Рис. 3-8. Установка камеры на проекционном аппарате.

тем быстро отпускают. Повторяя это несколько раз и постепенно увеличивая степень сжатия груши, находят такое соотношение объемов, при котором получается наилучшая видимость треков (рис. 3—9).

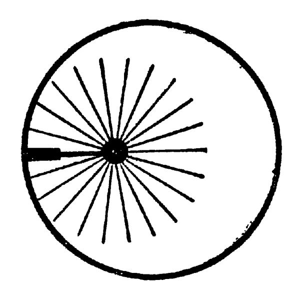


Рис. 3-9. Следы альфа-частиц в камере Вильсона.

Так как следы альфа-частиц можно наблюдать лишь в течение 1,5—2 с после расширения воздуха, то опыт следует еще несколько раз повторить при найденном оптимальном сжатии груши и обратить внимание учащихся на прямолинейность следов, их одинаковую толщину и длину, что указывает на одинаковую энергию всех вылетающих альфа-частиц. Все следы начинаются от поверхности радиоактивного препарата и резко обрываются в воздухе [1]. Длина пробега альфа-частиц зависит от величины их энергии и плотности среды, в которой они движутся.

Электрическое поле, приложенное к камере, играет в опыте второстепенную роль: оно удаляет из камеры ионы, непрерывно образующиеся под действием радиоактивного излучения. Без электрического поля наблюдение следов заряженных частиц было бы невозможно из-за образования в камере сплошного тумана.

Успех описанных опытов зависит главным образом от герметичности камеры. Герметичность обеспечивается исправностью камеры, а также плотным соединением резиновой трубки с камерой и грушей.

Вместо чистого спирта лучше применять смесь из 50% спирта, 25% ацетона и 25% воды. В этом случае фон тумана почти полностью отсутствует и следы ионизирующих частиц видны более отчетливо.

ОПЫТ 127. УСТРОЙСТВО И ДЕЙСТВИЕ ИНДИКАТОРА ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Оборудование: 1) индикатор ионизирующих частиц демонстрационный со счетной трубкой СТС-6 или СТС-8 [2], 2) индикатор ионизирующих частиц лабораторный, 3) усилитель низкой частоты из радиотехнического набора, 4) громкоговоритель электродинамический на подставке, 5) выпрямитель универсальный ВУП, 6) источник радиоактивных излучений, 7) провода соединительные с наконечниками.

Собирают установку по рисунку 3-10. На вход усилителя низкой частоты включают счетную трубку, укрепленную на демон-

[1] В случае загрязнения камеры радиоактивными веществами могут также наблюдаться следы, начинающиеся от стенок камеры.

[2] Прибор выпускается со счетной трубкой СТС-8, регистрирующей только гамма-излучение, трубка же СТС-6 позволяет регистрировать также и бета-излучение.

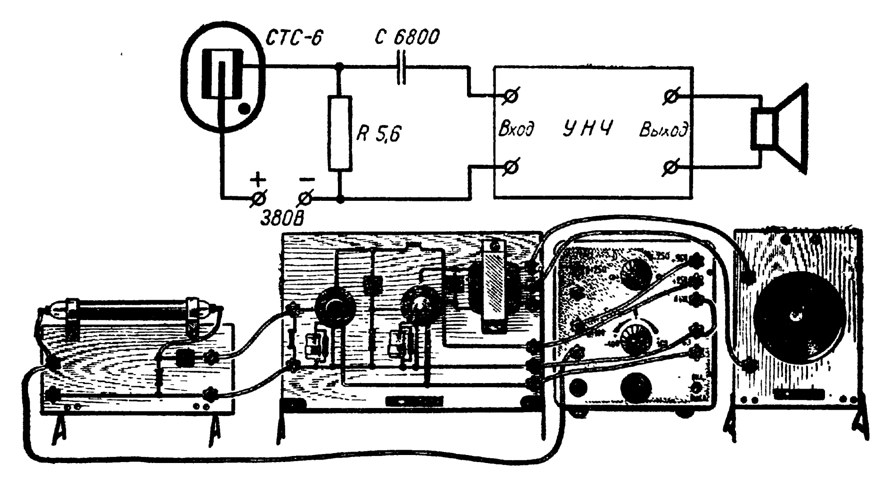


Рис. 3-10. Установка и ее схема для демонстрации действия индикатора ионизирующих частиц.

страционной панели, а на выход — электродинамический громкоговоритель. Индикатор и усилитель питают от универсального выпрямителя, причем на индикатор подают регулируемое в пределах от 0 до 450 В постоянное напряжение (соединяют последовательно зажимы, с которых снимаются постоянное напряжение 350 В и регулируемое напряжение 0±100 В), а на усилитель — постоянное напряжение 250 В и переменное 6,3 В. Электрическую схему установки вычерчивают на классной доске и разъясняют ее учащимся, причем работу усилителя низкой частоты не рассматривают. Основное внимание обращают на устройство, принцип действия и способ включения индикатора.

Счетная трубка представляет собой стеклянный или металлический баллон цилиндрической формы с двумя электродами (рис. 3-11). Катодом является либо металлический баллон, либо проводящий слой, нанесенный на внутреннюю поверхность стеклянного баллона. Анодом служит тонкая металлическая проволока, натянутая вдоль оси баллона.

Внутреннее пространство баллона заполнено специальной газовой смесью (аргон и пары спирта), находящейся под низким давлением.

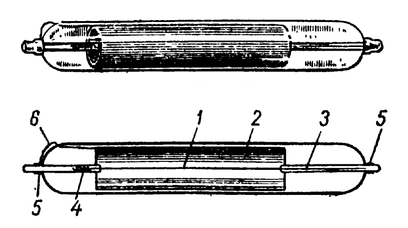


Рис. 3-11. Счетная трубка Гейгера — Мюллера (общий вид и разрез):

1 — металлическая нить; *2* — металлическое покрытие внутри стеклянной трубки; *3* и *4* — изолированные концы нити; *5* — контакты; *6* — проводник.

Напряжение на электродах счетной трубки выбирается такой величины, чтобы в сильном неоднородном поле вблизи нити могла возникнуть ионизация газа ударом электронов.

При попадании в трубку ионизирующей частицы происходит первичная ионизация газа. В результате последующей ионизации ударом ток в трубке резко возрастает. Этот ток, проходя через высокоомный резистор, создает на последнем значительные импульсы напряжения, которые через разделительный конденсатор поступают на вход усилителя низкой частоты. После усиления они воспроизводятся громкоговорителем в виде громких щелчков.

Благодаря специальному подбору состава газа («гасящая» смесь) возникший самостоятельный разряд прекращается. Образовавшиеся ионы в течение очень короткого времени (порядка $10^{-3}-10^{-4}$ с) нейтрализуются на электродах, и индикатор оказывается готовым к регистрации новой частицы.

С подготовленной установкой демонстрируют следующие опыты:

1. Обнаружение космического фона

На индикатор подают постоянное напряжение порядка 350—380 В. Радиоактивный источник удаляют возможно дальше от индикатора, и, несмотря на это, громкоговоритель воспроизводит редкие щелчки. Они возникают в результате попадания в счетную трубку космических лучей и незначительных радиоактивных излучений окружающих тел. Число импульсов, регистрируемых индикатором в течение одной минуты, называют естественным фоном.

2. Регистрация радиоактивных излучений

К счетной трубке подносят спинтарископ, причем линзу предварительно вывертывают. Частота щелчков резко увеличивается. Это объясняется действием на индикатор бета-частиц и гамма-лучей (альфа-частицы данным прибором не регистрируются). Вместо спинтарископа можно взять соли калия.

3. Работа индикатора в различных областях напряжения

Устанавливают радиоактивный препарат от спинтарископа около индикатора и плавно и медленно на нем увеличивают напряжение от 0 до 380 В. Демонстрируют три области работы индикатора.

Область низких напряжений. При низких напряжениях, порядка 200—300 В, счетная трубка работает как ионизационная камера. Первичные ионы, возникающие в трубке под действием ионизирующих частиц, движутся к электродам со ско-

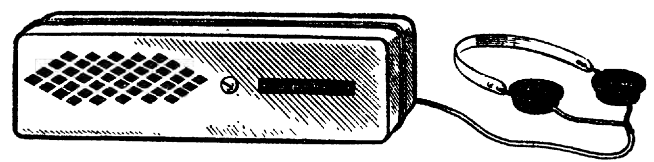


Рис. 3-12. Индикатор ионизирующих частиц лабораторный.

ростями, недостаточными для ионизации ударом, и образуют очень слабые импульсы тока, которые не регистрируются.

Пропорциональная область. Напряжение на индикаторе очень плавно увеличивают до тех пор, пока громкоговоритель не начнет издавать слабые щелчки. В этом случае напряженность электрического поля около нити в трубке становится достаточной для возникновения ионизации ударом, в разультате чего разряд в трубке приобретает лавинный характер. Число ионов резко возрастает и импульсы тока после усиления регистрируются громкоговорителем в виде слабых и редких щелчков различной громкости. При этом напряжении величина импульса пропорциональна числу ионов, образующихся при первичной ионизации, и можно легко различать частицы, производящие неодинаковую ионизацию.

Область Гейгера. При дальнейшем увеличении напряжения заметно увеличивается частота и громкость импульсов, причем пропорциональность между величиной импульса и первичной ионизацией нарушается: все импульсы становятся одинаковыми.

При неизменном напряжении производят подсчет импульсов два раза в течение одинаковых промежутков времени и обнаруживают несовпадение результатов счета. Это объясняют случайным характером радиоактивного распада.

Для подготовки к выполнению в практикуме лабораторной работы «Изучение радиоактивных излучений при помощи газоразрядного счетчика» учащихся знакомят с устройством и действием лабораторного индикатора (рис. 3-12).

С прибора снимают крышку и показывают основные части: самогасящуюся счетную трубку типа СТС-5, преобразователь напряжения с выпрямителем и источник питания (батарея для карманного фонаря). Для счета импульсов служат высокоомные головные телефоны.

Преобразователь напряжения содержит генератор переменного тока, собранный на транзисторе. Напряжение получаемого переменного тока повышается до 400 В при помощи трансформатора. Повышенное напряжение выпрямляется с помощью двух полупроводниковых диодов и подается на счетную трубку. Преобразователь включается с помощью кнопки, расположенной на тыльной стороне футляра.

Для демонстрации действия индикатора его выходные гнезда, предназначенные для включения телефона, соединяют с входом усилителя низкой частоты. Нажимают кнопку и слушают громкий звук с частотой 500—1000 Гц, который создает генератор преобразователя.

Через 3—5 с кнопку отпускают и слушают отдельные щелчки. Это индикатор регистрирует ионизирующие частицы.

Учащимся поясняют, что при выключенном преобразователе индикатор питается от заряженного конденсатора сглаживающего фильтра. Продолжительность работы зависит от интенсивности воздействующего радиоактивного излучения и составляет несколько минут. При проведении длительных наблюдений периодически повторяют включение преобразователя на 2—3 с.

ОПЫТ 128. РАБОТА ИНДИКАТОРА С ПЕРЕСЧЕТНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Оборудование: 1) индикатор ионизирующих частиц демонстрационный с трубкой СТС-6 или СТС-8, 2) источник радиоактивных излучений, 3) усилитель низкой частоты из радиотехнического набора, 4) диод полупроводниковый Д7Ж на подставке, 5) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 6) лампа неоновая МН-5 на подставке, 7) громкоговоритель электродинамический, 8) выпрямитель универсальный ВУП, 9) провода соединительные с наконечниками.

Пересчетные устройства применяют для уменьшения частоты регистрации импульсов, поступающих со счетчика. В результате применения таких устройств импульсы на выходе появляются достаточно редко и регистрация их не представляет затруднений.

Для демонстрации простейшего пересчетного устройства, выполненного на неоновой лампе, собирают установку по рисунку 3-13.

Индикатор подключают на вход усилителя низкой частоты. К крайним зажимам выходного трансформатора подключают

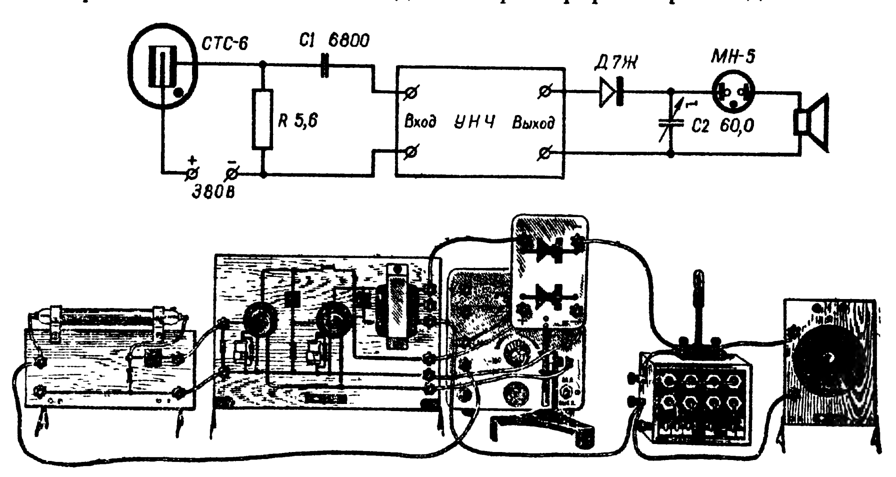


Рис. 3-13. Установка и ее схема для демонстрации пересчетного устройства.

последовательно полупроводниковый диод, взятый из демонстрационного комплекта полупроводниковых приборов, неоновую лампу МН-5 и громкоговоритель; параллельно цепи из неоновой лампы и громкоговорителя включают демонстрационную батарею конденсаторов. Питание индикатора и усилителя осуществляют от универсального полупроводникового выпрямителя.

При демонстрации опыта подносят к индикатору источник радиоактивных излучений сначала при выключенной батарее конденсаторов и наблюдают частые вспышки неоновой лампы и одновременно прослушивают частые щелчки в громкоговорителе. Затем с помощью коммутатора включают батарею конденсаторов, увеличивая скачками ее емкость. При этом число импульсов, регистрируемых пересчетным устройством, заметно уменьшается. При емкости батареи в 4 мкФ частота следования импульсов уменьшается примерно в 10 раз.

На классной доске вычерчивают схему пересчетного устройства (см. рис. 3-13) и объясняют принцип его действия.

Слабые импульсы от индикатора поступают вначале на усилитель низкой частоты и после усиления подаются на пересчетное устройство. Полупроводниковый диод, включенный на выходе усилителя, пропускает импульсы тока к конденсатору C_2 и в то же время не дает конденсатору разряжаться через обмотку выходного трансформатора усилителя, так как не пропускает ток в обратном направлении. Под действием поступающих импульсов тока конденсатор C_2 постепенно заряжается, и, когда напряжение на нем сравнивается с потенциалом зажигания неоновой лампы, последняя вспыхивает. Конденсатор разряжается через неоновую лампу и динамик до напряжения погасания неоновой лампы. Громкоговоритель дает громкий щелчок. Затем процесс повторяется.

Каждому разряду конденсатора соответствует приблизительно одинаковое число первичных импульсов тока, поступающих от индикатора. Это число называют коэффициентом пересчета. Коэффициент пересчета при прочих равных условиях возрастает с увеличением емкости накопительного конденсатора.

Заметим, что включение громкоговорителя в этом опыте не является обязательным: счет импульсов можно вести по вспышкам неоновой лампы.

129. ФРАГМЕНТЫ «РАДИОАКТИВНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ» И «ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ» ИЗ КИНОФИЛЬМА «АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО»

Оборудование: 1) кинофильм «Атом и атомное ядро» (фрагменты «Радиоактивное излучение» и «Обнаружение радиоактивного излучения»), 2) кинопроектор, 3) альбом «Физика атомного ядра», 4) эпипроектор, 5) экран проекционный.

Первый фрагмент «Радиоактивное излучение» из кинофильма «Атом и атомное ядро» показывают при изучении явления есте-

ственной радиоактивности. Поскольку демонстрация этого явления в условиях школы невозможна, то показ фрагмента позволяет обеспечить необходимую наглядность на уроке.

В первом фрагменте показывается опыт Беккереля, приведший к открытию радиоактивного излучения, рассказывается об исследованиях М. Склодовской и П. Кюри, связанных с открытием радия, показываются состав радиоактивного излучения (альфа-частицы, бета-частицы, гамма-лучи) и его свойства, а также применение гамма-лучей в дефектоскопии. В конце фрагмента рассказывается об опыте Резерфорда по обнаружению природы альфа-частиц. (Демонстрация фрагмента занимает 8 мин.)

Второй фрагмент — «Обнаружение радиоактивного излучения» — демонстрируют при изучении экспериментальных методов наблюдения и регистрации заряженных частиц.

В этом фрагменте показано устройство и принцип действия спинтарископа, счетчика Гейгера, камеры Вильсона и пузырьковой камеры.

Фрагмент показывают с целью повторения устройства и действия этих приборов. При этом обращают внимание на физические процессы, протекающие в каждом приборе, и область применения приборов. Дополнительно учащихся знакомят с методом толстослойных фотоэмульсий.

В заключение показывают фотографии треков различных частиц, полученные в вильсоновской и пузырьковой камерах и фотоэмульсиях из альбома «Физика атомного ядра».

ОПЫТ 130. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РАДИОМЕТРА И ОПЫТЫ С НИМ

Оборудование: 1) индикатор ионизирующих частиц демонстрационный с трубкой СТС-6, 2) источники радиоактивных излучений, 3) усилитель низкой частоты из радиотехнического набора, 4) диод полупроводниковый Д7Ж на подставке, 5) батарея конденсаторов емкостью 58 мкФ, 6) гальванометр демонстрационный от амперметра, 7) выпрямитель универсальный ВУП, 8) трансформатор универсальный, 9) пластинки из различных веществ, 10) пластина свинцовая толщиной 2 мм с отверстием, 11) штатив универсальный, 12) провода соединительные с наконечниками.

Для демонстрации принципа действия радиометра собирают установку по рисунку 3-14. На вход усилителя низкой частоты включают демонстрационный индикатор, а к низкоомному выходу усилителя (верхние два зажима) подключают последовательно полупроводниковый диод и батарею конденсаторов емкостью 40—58 мкФ. Параллельно батарее конденсаторов подключают через резистор сопротивлением 5—10 кОм демонстрационный гальванометр.

По схеме объясняют принцип действия установки (рис. 3-14). Конденсатор C_2 и резистор R_2 образуют так называемый интегрирующий контур. Полупроводниковый диод, включенный на входе этого контура, пропускает импульсы тока на зарядку конденсатора и в то же время не дает конденсатору разряжаться, так как

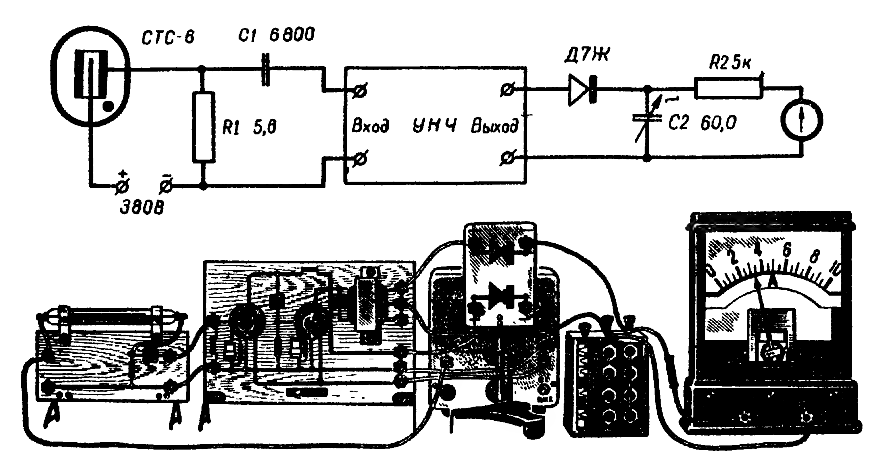


Рис. 3-14. Установка и ее схема для демонстрации принципа действия радиометра.

не пропускает ток в обратном направлении. С другой стороны, конденсатор непрерывно разряжается через резистор R_2 и гальванометр.

По мере накопления заряда на конденсаторе процесс его зарядки происходит все медленнее, а процесс разрядки — все быстрее. Так продолжается до тех пор, пока на конденсаторе не установится такое напряжение, при котором скорость зарядки станет равна скорости разрядки. С этого момента сила тока, протекающего через гальванометр, станет неизменной и будет соответствовать данной частоте поступления импульсов. Если импульсы станут поступать чаще, то в цепи гальванометра установится большая сила тока. Наоборот, при уменьшении частоты поступления импульсов показания гальванометра также уменьшаются. Таким образом, измеряя средний установившийся разрядный ток, определяют среднее число импульсов в единицу времени, т. е. скорость счета.

С подготовленной установкой демонстрируют следующие опыты:

1. Обнаружение радиоактивного излучения

К индикатору медленно приближают источник радиоактивных излучений и наблюдают постепенное увеличение показаний гальванометра. При удалении источника показания гальванометра уменьшаются.

2. Сравнение интенсивности излучения двух источников

Два сравниваемых источника поочередно подносят на одинаковое расстояние к индикатору и каждый раз замечают показа-

ния гальванометра. Отношение полученных значений силы тока (за вычетом начального тока) равно отношению активностей сравниваемых источников.

3. Поглощение радиоактивного излучения различными веществами

Радиоактивный препарат, например от спинтарископа, устанавливают на таком расстоянии от индикатора, чтобы стрелка демонстрационного гальванометра отклонилась на полную шкалу.

В пространство между радиоактивным препаратом и индикатором вносят поочередно пластинки из различных веществ (дерево, пластмасса, алюминий и др.) одинаковой толщины. По показаниям гальванометра судят о различной их способности, поглощать радиоактивное излучение.

Помещая пластинки из одинакового материала, но различной толщины, демонстрируют зависимость поглощения излучения от толщины поглощающего слоя. Сообщают учащимся, что измерение ослабления радиоактивного излучения при прохождении через вещество лежит в основе действия многочисленных приборов и установок технологического контроля (дефектоскопы, плотномеры, толщиномеры и др.).

4. Регистрация различных видов радиоактивного излучения

Разные виды радиоактивного излучения обладают различной проникающей способностью. Это можно положить в основу метода отделения одного вида излучения от другого.

Исследуемый источник, например от спинтарископа, закрывают свинцовой пластинкой толщиной 1—2 мм и подносят к индикатору. Гальванометр обнаруживает только гамма-излучение, так как альфа- и бета-частицы задерживаются экраном.

Убирают свинцовую пластинку — показания гальванометра резко увеличиваются: индикатор стал регистрировать, кроме гамма-излучения, еще и бета-излучение. Альфа-частицы обладают очень малой проникающей способностью и данным индикатором не регистрируются.

5. Принцип гамма-дефектоскопии

Свинцовую пластину толщиной 1—2 мм, в которой предварительно сделано отверстие размером 20×10 мм, обертывают тонкой алюминиевой фольгой и медленно проносят между спинтарископом и счетной трубкой. По отклонению стрелки гальванометра определяют место «дефекта» в пластине. Затем пластину вынимают из фольги и показывают учащимся.

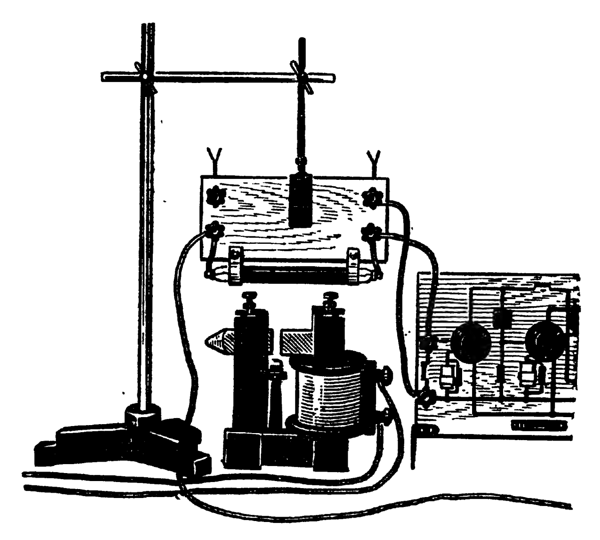


Рис. 3-15. Установка для демонстрации отклонения бета-частиц в магнитном поле.

б. Отклонение бета-частиц в магнитном поле

Индикатор укрепляют на подставку в лапке штатива над электромагнитом, собранным из железного сердечника от универсального трансформатора и катушки на напряжение 220 В (рис. 3-15).

Между полюсными наконечниками сердечника оставляют воздушный зазор шириной 1,5—2 см, а внизу, под зазором, располагают радиоактивный препарат от спинтарископа так, чтобы он находился на расстоянии примерно 5 см от индикатора. Источник излучения закрывают свинцовой пластиной, в которой сделано отверстие размером 20×10 мм.

При отсутствии тока в обмотке электромагнита индикатор регистрирует бета- и гамма-излучение, которое свободно попадает в него через отверстие в свинцовой пластине и воздушный зазор сердечника. При этом стрелка гальванометра отклоняется на несколько делений шкалы.

После включения постоянного тока в обмотку электромагнита показания гальванометра резко уменьшаются. Это происходит потому, что бета-частицы отклоняются магнитным полем и не попадают в индикатор. Слегка передвигая индикатор вперед или назад, можно по показаниям гальванометра отыскать новое направление движения бета-частиц. При проведении демонстрации можно также менять направление тока и определять, в какую сторону должны отклониться бета-частицы, а затем при помощи индикатора их обнаружить.

В заключение заметим, что описанные выше опыты можно демонстрировать также на установке, показанной на рисунке 3-10. Однако регистрация импульсов на слух менее удобна и излишне затягивает опыт.

ОПЫТ 131. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Оборудование: 1) индикаторы ионизирующих частиц лабораторные — 2 шт., 2) усилитель низкой частоты из радиотехнического набора, 3) громкоговоритель электродинамический на подставке, 4) выпрямитель универсальный ВУП, 5) потенциометр радиотехнический сопротивлением 1,0—1,5 МОм на подставке, 6) провода соединительные с наконечниками, 7) штатив универсальный.

Направление распространения космических лучей можно определить с помощью двух индикаторов, если включить их в электрическую цепь по так называемой схеме совпадений.

Для этого собирают установку по рисунку 3-16. На стойке демонстрационного штатива закрепляют на разной высоте два лабораторных индикатора так, чтобы нити их счетных трубок были параллельны. Выходные гнезда индикаторов, предназначенные для включения телефонов, соединяют последовательно и подключают к входным зажимам усилителя низкой частоты. К усилителю подключают еще громкоговоритель и универсальный полупроводниковый выпрямитель. Зажимы выпрямителя, с которых снимается регулируемое постоянное напряжение, соеди-

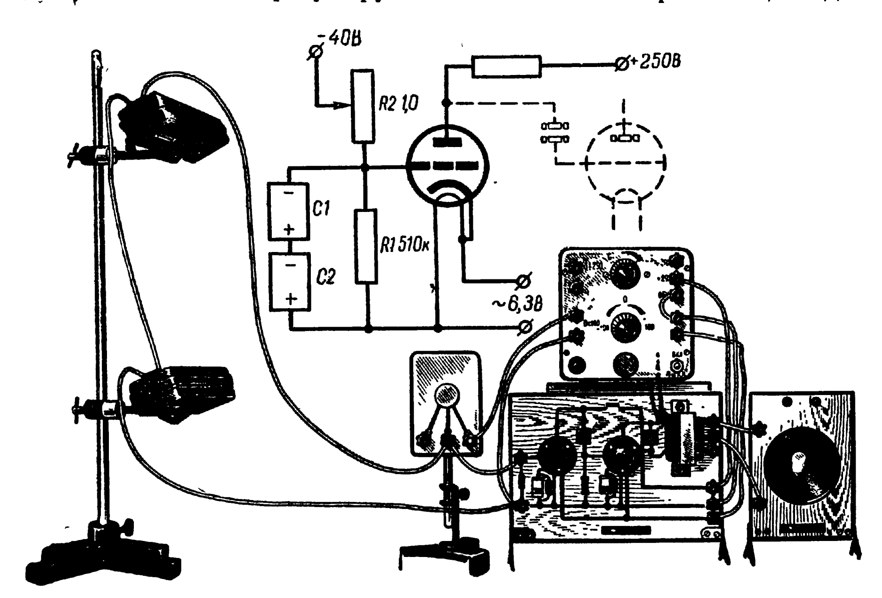


Рис. 3-16. Установка и схемы включения двух индикаторов для демонстрации направления распространения космических лучей.

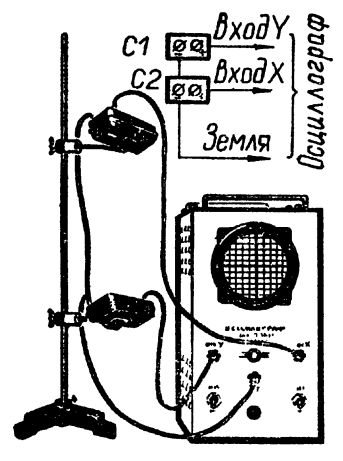


Рис. 3-17. Установка и схема включения двух индикаторов с осциллографом для регистрации космических лучей.

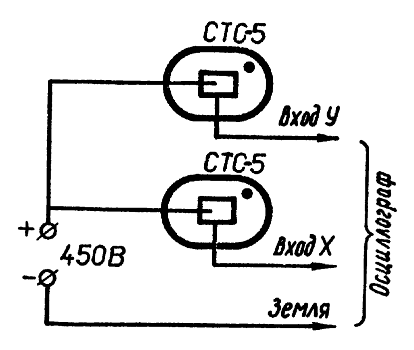


Рис. 3-18. Схема включения индикаторов для демонстрации квантового характера электромагнитного излучения.

няют через реостат сопротивлением 1,0—1,5 МОм с входными зажимами усилителя, причем зажим, обозначенный знаком «—», соединяют с выводом сетки входной лампы, а зажим со знаком «+» — с выводом катода этой лампы.

Схему включения индикаторов (см. рис. 3-16) вычерчивают на классной доске и объясняют учащимся.

Выпрямитель включают в сеть и приступают к демонстрации опыта.

У каждого индикатора включают на 2—3 с генератор преобразователя тока. В результате индикаторы приходят в действие и начинают регистрировать пролетающие через них космические частицы. При этом на вход усилителя с каждого индикатора начинают поступать положительные импульсы напряжения. Если на сетку входной лампы напряжение смещения не подано, то все импульсы проходят через усилитель и регистрируются громкоговорителем в виде громких щелчков.

Затем плавно увеличивают напряжение отрицательного смещения на входе усилителя. Входная лампа постепенно запирается и перестает пропускать приходящие импульсы. При этом щелчки в громкоговорителе стихают. Напряжение смещения подбирают немного меньше амплитудного значения напряжения приходящих импульсов, чтобы они все же прослушивались в виде тихих щелчков. Однако, если одна и та же космическая частица пройдет оба индикатора, импульсы складываются и регистрируются в виде одного громкого щелчка. При этом можно сделать заключение, что соответствующие космические лучи приняты с

направления, указываемого плоскостью, проходящей через счетные трубки обоих индикаторов.

Устанавливая стойку штатива под разными углами к вертикали, находят опытным путем такое положение «космического пеленгатора», при котором громкие щелчки на выходе усилителя прослушиваются наиболее часто.

В этом опыте в качестве регистрирующего прибора может быть применен школьный электронный осциллограф. В этом случае выходные гнезда индикаторов, предназначенные для включения телефонов, соединяют параллельно и подключают к осциллографу, как показано на рисунке 3-17.

Генератор развертки осциллографа выключают, а светлое пятно выводят в центр экрана. На экране наблюдают то вертикальные, то горизонтальные «всплески» светлого пятна, в зависимости от того, какой индикатор регистрирует космическую частицу. Это говорит о том, что индикаторы срабатывают разновременно. Но на экране изредка наблюдаются «всплески» светлого пятна по диагонали, что указывает на одновременность срабатываний индикаторов. А это, в свою очередь, означает, что индикаторы в этих случаях регистрируют одну и ту же космическую частицу.

Параллельное включение индикаторов к осциллографу (рис. 3-18) можно использовать также для доказательства квантового характера электромагнитного излучения. Для этого достаточно между индикаторами расположить какой-нибудь источник гамма-излучения (радиоактивный препарат, закрытый в металлическую коробочку толщиной 1—2 мм для поглощения бета-частиц).

Срабатывание то одного, то другого индикатора убедительно приводит к выводу, что гамма-излучение при взаимодействии с веществом проявляет себя как поток частиц (фотонов).

СПИСОК САМОДЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПОСОБИИ

Глава I

1. Экран для черного, белого и просвечивающего фона.
2. Шар деревянный для маятников и к нему демпфер.
3. Экран из фанеры для записи механических колебаний.
4. Прибор для демонстрации релаксационных колебаний уровня воды в сосуде.
5. Щиток с зажимами для удобства сборки сложной электрической установки.
6. Прибор для магнитной записи и воспроизведения звука.
7. Два диполя — с искровым промежутком и с когерером.

Глава II

8. Осветитель с патроном и электрической лампой.
9. Кружок картонный на стойке для демонстрации тени и полутени.
10. Фотометр демонстрационный.
11. Горелка для получения пламени, окрашенного парами натрия.
12. Таблица кривых распределения энергии в спектре абсолютно черного тела при разной температуре.
13. Прибор лабораторный для воспроизведения звука с киноленты.

Глава III

14. Колба с резиновой грушей для демонстрации конденсации пара на заряженных частицах.

ВЫДЕРЖКА ИЗ ПРАВИЛ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ КАБИНЕТОВ (ЛАБОРАТОРИЙ) ФИЗИКИ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ СИСТЕМЫ МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ СССР

ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ, ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И РАБОТ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

1. Общие правила

Руководители школ и учителя физики должны постоянно помнить, что некоторые приборы, установки, материалы, а также источники энергии, используемые в процессе преподавания физики, могут нанести ущерб здоровью учащихся при неумелом или небрежном с ними обращении.

Неаккуратность, невнимательность, недостаточное знакомство с приборами и незнание правил техники безопасности могут повлечь за собой несчастные случаи.

Во избежание этого каждый демонстрационный опыт и лабораторное занятие должны быть тщательно продуманы учителем в отношении мер безопасности, а при их проведении учитель обязан показывать пример точного соблюдения правил техники безопасности.

Перед проведением учащимися эксперимента учитель обязан проинструктировать их о порядке проведения данного опыта для предупреждения возможных несчастных случаев.

К практическим работам допускаются учащиеся, прошедшие углубленный медицинский осмотр и хорошо освоившие правила техники безопасности. Практические работы в кабинете (лаборатории) физики проводятся только в присутствии учителя физики, или лаборанта, или руководителя кружка, под их руководством и постоянным наблюдением за действиями учеников, за выполнением ими работ в строгом соответствии с правилами по технике безопасности.

Для проведения определенного рода опытов и их демонстраций необходимо иметь специальные подставки. Использовать вместо них случайные предметы (учебники, сумки учеников и т. д.) запрещается.

Во время проведения опыта на демонстрационном столе не должно быть никаких посторонних предметов.

При проведении лабораторных работ или демонстраций пользоваться разбитой или стеклянной посудой с трещинами запрещается. Во всех опытах, требующих нагнетания или откачивания воздуха из стеклянных сосудов, а также повышения в них давления путем нагревания, необходимо применять защитные чехлы или экраны из органического стекла, а также защитные очки

или маски. Осколки стекла со стола нельзя стряхивать руками. Для этого необходимо использовать щеточку и совок. Таким же образом необходимо стряхивать и металлические опилки, используемые при наблюдении магнитных спектров.

Следует постоянно следить за исправностью всех креплений в приборах, предназначенных для вращения на центробежной машине, универсальном электродвигателе, вращающемся диске. Во время демонстрации нельзя превышать пределы допустимых для данных приборов скоростей вращения.

Для предотвращения несчастных случаев приборы на демонстрационном столе следует размещать таким образом, чтобы во время опытов исключить всякую возможность попадания отлетевших деталей в учащихся, для чего следует применять защитные экраны из органического стекла.

При демонстрации колебаний груза на стальном полотне или подвешенного на нити груз следует надежно укрепить, чтобы он не сорвался. По той же причине необходимо избегать острого резонанса. При демонстрации свободного падения тел на пол следует положить мешочек с песком.

Для исключения случаев ожога учеников при нагревании сосудов с водой их нельзя закрывать глухой пробкой; стеклянные колбы необходимо ставить на асбестовые сетки. При выполнении работы на установление теплового баланса воду следует нагревать не свыше 60—70 °С.

Категорически запрещается оставлять без присмотра работающие электронагревательные приборы.

Легковоспламеняющиеся летучие жидкости (эфир, бензин, ацетон и т. п.), хранящиеся в сосудах с притертыми пробками, помещаются вдали от нагревателей, которые могут вызвать их воспламенение. Переливать легковоспламеняющиеся жидкости следует над специальной кюветой, не допуская их разлива. Категорически запрещается применять в качестве топлива бензин.

Нельзя зажигать спиртовку от другой горящей. Во избежание взрыва сосуда спиртовки не допускается выгорание спирта более чем на $^2/_3$ объема сосуда. Разлитый горящий керосин нельзя гасить водой. Для этой цели необходимо использовать огнетушитель или сухой песок, одеяло или асбестовую ткань.

Учителя физики и руководители школ должны постоянно помнить, что горючий газ ядовит и взрывоопасен. Неправильное и небрежное пользование им может вызвать отравление, пожар, взрыв. Необходимо следить, чтобы пламя не проникало внутрь горелки. В случае обнаружения запаха газа необходимо закрыть газовые горелки, отключить подачу газа, запретить зажигать огонь, включать и выключать освещение и различные электрические приборы, проветрить помещение. (См. «Правила по технике безопасности для кабинетов химии общеобразовательных школ системы Министерства просвещения СССР», утвержденные заместителем министра просвещения СССР 1 ноября 1972 г.)

Особую опасность представляет работа с аккумуляторами. В частности, попадание щелочи или кислоты на открытые участки тела учеников может вызвать ожоги. Аккумуляторы нельзя наклонять, необходима особая осторожность при их транспортировке.

Аккумуляторы должны храниться в шкафу с вытяжным устройством или в отдельном хорошо проветриваемом помещении. Кислотные аккумуляторы хранятся отдельно от щелочных.

Зарядку аккумулятора нельзя пробовать «на искру», а тем более прикасаться к их клеммам языком. Во избежание короткого замыкания на аккумуляторы нельзя ставить посторонние предметы. (См. «Правила по технике безопасности при проведении занятий в кабинетах электротехники и практики на промышленных объектах школьников», утвержденные заместителем министра просвещения СССР в 1972 г.)

Проведение лабораторных работ с применением ртути запрещается. Ртутные термометры необходимо хранить в чехлах. При разбивании термометров ртуть необходимо тщательно собрать. Для этого можно использовать амальгамированную медную или из белой жести пластинку, которые необходимо хранить в специальных сосудах (см. «Правила по технике безопасности для кабинетов химии общеобразовательных школ системы Министерства просвещения СССР»).

С целью предотвращения облучения рентгеновскими лучами, гамма- и другими ионизирующими излучениями учеников и учителей в школах запрещены демонстрации с рентгеновскими трубками, трубками со звездой, «мельницей», для демонстрации отклонения катодных лучей.

Не допускается непосредственное воздействие на учащихся света от мощных источников: электрической дуги, ламп от проекционной аппаратуры, стробоскопа и т. д. Для этой цели необходимо использовать защитные кожухи и фильтры.

В кабинете (лаборатории) физики необходимо иметь медицинскую аптечку и комплект средств индивидуальной защиты от поражения электрическим током, на видном месте должны быть вывешены предупреждающие надписи, инструкция по технике безопасности, составленная заведующим лаборатории физики и утвержденная директором школы по согласованию с местным комитетом профсоюза. Перечень перевязочных средств и медикаментов для медицинской аптечки кабинета (лаборатории) физики и типовая инструкция по технике безопасности для учеников прилагаются.

2. Правила электробезопасности

1. Перед работой необходимо тщательно ознакомиться с описаниями приборов и, прежде чем включить прибор в цепь, проверить, соответствует ли напряжение в сети тому, на которое рассчитан прибор. На всех приборах на видном месте должны быть указатели напряжения, на которое они рассчитаны, и их полярность.

Следует учитывать, чтобы максимальное измеряемое напряжение не превышало пробойного напряжения изоляции прибора.

2. Используемые приборы должны быть исправны, отрегулированы, содержаться в чистоте и регулярно проверяться.

Приборы, используемые учащимися, должны иметь ограничивающие устройства, исключающие возможность поражения электрическим током. Эти устройства должны или понижать напряжение до безопасной величины, или иметь добавочное сопротивление, ограничивающее силу тока до 0,01 А.

Корпуса приборов, где это необходимо, должны заземляться. В качестве заземления запрещается использовать газо-, водопроводные и отопительные трубы.

При выполнении работ приборы нельзя оставлять у края стола. Их необходимо располагать таким образом, чтобы было удобно вести измерения, не перегибаясь через них или соединительные провода.

3. Соединительные провода должны быть гибкими, хорошо изолированными, с наконечниками. При сборке цепи они не должны скручиваться, натягиваться. Сечение проводов должно соответствовать текущему по ним току.

Для включения и выключения тока в цепи необходимо использовать выключатели и только ими прерывать ток. Все розетки, щитки, вилки не должны иметь трещин, сколов и т. д.

Инструмент, применяемый в электромонтажных работах (отвертки, кусачки, плоскогубцы и т. д.), должен иметь изолированные ручки.

4. Предохранители должны быть калиброванными, категорически запрещается использовать самодельные предохранители. Установка и замена предохранителей так же, как и сборка цепи или устранение в ней неполадок, должна осуществляться только при отключенном напряжении.

5. Наличие напряжения в цепи можно проверять только приборами.

6. Во избежание поражения статическим электричеством все конденсаторы необходимо сразу же после опытов разряжать. Особенно внимательными и аккуратными следует быть при замыкании и размыкании цепей, имеющих катушки большой индуктивности. При опытах с сильными магнитными полями необходимо снять с руки часы.

При всех случаях обнаружения повреждения электрического оборудования, измерительных приборов и проводов (появление специфического запаха, дыма, нагревание проводов и т. д.) необходимо отключить напряжение.

По окончании работы следует немедленно выключить электроприборы, закрыть газовые краны.

3. Правила техники безопасности при работе с химическими реактивами

При проведении некоторых опытов по физике используются растворы кислот, солей, щелочей. Следует иметь в виду, что некоторые из этих веществ могут вызвать ожоги, отравления и т. д.

Во избежание этого необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Категорически запрещается учащимся работать с концентрированными кислотами и растворами едких щелочей.

2. При определении веществ по запаху нельзя наклоняться над горлом сосуда и сильно вдыхать пары или выделяющийся газ. Для этого следует легким движением ладони направить пары или газ к носу и вдыхать осторожно.

Запрещается проба веществ на вкус!

3. Химические реактивы следует хранить в физическом кабинете (лаборатории) в металлическом ящике, запирающемся на ключ. Кислоты хранятся отдельно от щелочей и других реактивов. Для них следует выделить отдельную полку или отделение.

4. Все реактивы следует хранить в пластмассовой, стеклянной или керамической посуде, закрывающейся пробками. На посуде должны быть при-

клеены бумажные этикетки, на которых ставится отчетливо название веществ, а для растворов указана их концентрация. Сильнодействующие ядовитые вещества следует пометить надписями «Яд», горючие — «Беречь от огня!».

5. При составлении растворов кислоту следует лить в воду, а не наоборот. Наливать в сосуд концентрированные растворы кислот и щелочей следует только струйкой, используя воронки или палочки.

6. Использованные растворы химических реактивов, непригодные к дальнейшему употреблению, запрещается выливать в водопроводную раковину.

7. Кислоты, попавшие на кожу человека или одежду, нейтрализуются щелочами (сода, нашатырный спирт), едкие щелочи, гидраты окиси калия и натрия нейтрализуются разбавленной уксусной кислотой (уксусом).

В кабинете (лаборатории) физики всегда необходимо иметь запас нейтрализующих веществ в легкодоступном месте.

8. При попадании в полость рта органических жидкостей (ацетона, формалина, метилового или амилового спирта, анилина, аммиака) следует прополоскать рот водой. В случае, если реактив проглочен, необходимо вызвать врача, а до его прихода поить пострадавшего молоком или сырыми яйцами.

При отравлении окисью углерода или сероводородом пострадавшего необходимо немедленно вывести на свежий воздух, освободить от стесняющей дыхание одежды, обеспечить вдыхание кислорода (чистого или с добавкой 5—7% углекислоты).

4. Правила техники безопасности при демонстрации учебных фильмов

Демонстрация учебных фильмов в школе допускается только на узкопленочной киноаппаратуре с несгораемой пленкой при соблюдении следующих требований:

1. Выход из помещения, где производится показ учебных кинофильмов, должен быть обеспечен непосредственно в коридор или на лестничную площадку.

2. В помещении не разрешается присутствие более одного класса учащихся. Во время демонстрации кинофильма стоять в проходах или устанавливать в них стулья воспрещается. Запрещается также закрывать двери на запоры и загромождать проходы к ним.

3. При демонстрации фильмов в лаборатории физики центр экрана должен находиться в полутора метрах от пола.

4. К работе на киноаппаратуре допускаются лица, имеющие права кинодемонстратора, а также талон пожарной безопасности, выданный дирекцией киносети райпожинспекцией при исполкомах районных (городских) Советов народных депутатов.

5. Электропроводка в помещении, где проводится показ фильмов, должна быть постоянного исполнения и отвечать требованиям правил устройства электроустановок.

6. При демонстрации учебных фильмов на негорючей основе допускается установка киноаппаратуры непосредственно в лаборатории физики, причем киноаппарат не должен мешать выходу из помещения.

7. Кинофильмы должны храниться в плотно закрытых металлических коробках.

УТВЕРЖДАЮ

Директор школы

« » 197 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1

СОГЛАСОВАНО

Председатель МК

« » ———— 197 г.

Типовая инструкция по технике безопасности в кабинете (лаборатории) физики для учеников

1. Будьте внимательны, дисциплинированны, осторожны; точно выполняйте указания учителя.
2. Не оставляйте рабочего места без разрешения учителя.
3. Располагайте приборы, материалы, оборудование на рабочем месте в порядке, указанном учителем.
4. Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся для выполнения задания.
5. Перед тем как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание, уясните ход выполнения.
6. Производите сборку электрических цепей, переключения в них, монтаж и ремонт электрических устройств только при отключении источника питания.
7. Не включайте источники электропитания без разрешения учителя.
8. Проверяйте наличие напряжения на источнике питания или других частях электроустановок с помощью указателя напряжения.
9. Следите, чтобы изоляция проводов была исправна, а на концах проводов наконечники; при сборке электрической цепи провода располагайте аккуратно, а наконечники плотно зажимайте клеммами.
10. Выполняйте наблюдения и измерения, соблюдая осторожность, чтобы случайно не прикоснуться к оголенным проводам (токоведущим частям, находящимся под напряжением).
11. Не прикасайтесь к конденсаторам даже после отключения электрической цепи от источника электропитания: их сначала нужно разрядить.
12. По окончании работы отключите источник электропитания, после чего разберите электрическую цепь.
13. Обнаружив неисправность в электрических устройствах, находящихся под напряжением, немедленно отключите источники электропитания и сообщите об этом учителю.

Зав. лабораторией ____________

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2

Перечень перевязочных средств и медикаментов для аптечки школьного кабинета (лаборатории) физики

1. Индивидуальные перевязочные антисептические средства (пакеты)	— 3 шт.
2. Бинты	— 3 шт.
3. Вата в пакетах	— 2 шт.
4. Жгут	— 1 шт.
5. Настойка йода	1 флакон или 10 ампул
6. Нашатырный спирт	1 флакон или 10 ампул
7. 2—4%-ный раствор борной кислоты	1 флакон 250 мл
8. 3%-ный раствор уксусной кислоты	1 флакон 250 мл
9. Сода	— 1 пачка
10. Мазь от ожога	— 1 тюбик
11. Валидол	— 1 тюбик

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3

Заземление электроустановок

1. Для обеспечения безопасности людей в соответствии с требованиями правил устройства электроустановок (ПУЭ) должны быть сооружены заземляющие устройства и к ним надежно подключены металлические части электроустановок и корпуса электрооборудования, которые вследствие нарушения изоляции могут оказаться под напряжением.

Работы в электроустановках с заземленной нейтралью (380/220 В) производятся в более опасных условиях, так как прикосновение к токоведущим частям и конструкциям, находящимся под напряжением вследствие порчи изоляции, приводит к поражению током фазного напряжения.

2. Заземление электроустановок необходимо выполнять: а) при напряжении 500 В и выше во всех случаях; б) при напряжении выше 36 В переменного и 110 В постоянного тока во всех случаях, за исключением взрывоопасных установок.

К частям, подлежащим заземлению, относятся: а) корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т. п.; б) приводы электрических аппаратов; в) вторичные обмотки измерительных трансформаторов и трансформаторов местного освещения 36 В, а также корпуса последних; г) каркасы распределительных щитов, щитов управлений, шкафов, металлические конструкции распределительных устройств, металлические кабельные конструкции, металлические корпуса кабельных муфт, металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, металлические оболочки проводов, стальные трубы электропроводки и другие металлические конструкции, связанные с установленным электрооборудованием; д) металлические корпуса передвижных и переносных электроприемников.

3. В электроустановках с глухо заземленной нейтралью при замыканиях на землю должно быть обеспечено надежное автоматическое отключение поврежденных участков сети.

4. В электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью обязательна металлическая связь корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью источника питания, выполняемой нулевым проводом или посредством заземляющих проводников, проложенных совместно или в непосредственной близости с фазными.

5. В электроустановках с глухозаземленной нейтралью применение заземления корпусов электрооборудования без осуществления металлической связи с нейтралью трансформатора запрещается. В цепи нулевых проводов, если они одновременно служат для целей заземления, не должно быть разъединяющих аппаратов и предохранителей.

6. В электроустановках с изолированной нейтралью напряжением выше 36 В должна быть предусмотрена возможность выявления и быстрого отыскания замыканий на землю при помощи устройств контроля изоляции. Использование «земли» в качестве фазного или нулевого провода в электроустановках напряжением до 1000 В запрещается, так как такие установки могут привести к поражениям электрическим током.

7. Каждая заземляемая установка должна быть присоединена к заземлителю или заземляющей магистрали посредством отдельного ответвления. Последовательное включение в заземляющий проводник нескольких заземляемых частей запрещается. Присоединение заземляющих проводников к заземлителям должно быть выполнено сваркой, а к корпусам аппаратов, машин и т. п.— сваркой или надежным болтовым соединением.

Концы заземляющих гибких проводников, применяемых для присоединения к корпусам аппаратов, машин и т. д., должны иметь приваренные наконечники.

Заземляющие проводники, расположенные в помещениях, должны быть доступны для осмотра.

Это требование не относится к нулевым жилам и металлическим оболочкам кабелей, трубопроводам скрытой электропроводки, а также проводникам заземления, проложенным в трубах.

8. Текущий ремонт заземляющих устройств производится не реже одного раза в год.

В него входит — проверка состояния элементов заземляющего устройства, проверка наличия цепи между контуром заземления и заземляющими устройствами (элементами), измерение сопротивления заземляющего устройства (для подстанции не реже одного раза в 3 года).

9. Максимально допустимая величина сопротивления заземляющих устройств электроустановок напряжением до 1000 В 4 Ом.

10. Капитальный ремонт заземляющего устройства производится в сроки, устанавливаемые ответственным за электрохозяйство.

Проверка полного сопротивления петли «фаза — нуль» в установках с глухим заземлением нейтрали производится после окончания работ, перед допуском установки в эксплуатацию и не реже 1 раза в пять лет после ввода.

11. Величина сопротивления должна быть такова, чтобы при замыкании между фазами и заземляющими проводниками возникал ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток ближайшей плавкой вставки или в 1,5 раза — ток отключения максимального расцепителя соответствующего автоматического выключателя.

12. В качестве заземляющих проводников могут быть использованы: а) металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т. д.); б) стальные трубы электропроводок; в) алюминиевые оболочки кабелей; г) в зданиях стальные круглые проводники диаметром не менее 5 мм; д) в зданиях прямоугольные проводники сечением не менее 24 мм^2; е) голые медные или алюминиевые проводники при открытой прокладке соответственно сечением 4 и 6 мм^2; ж) изолированные провода медные или алюминиевые соответственно сечением 1,5 и 2,5 мм^2; з) заземляющие жилы кабелей или многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами или алюминиевыми соответственно сечением 1 и 1,5 мм^2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

II. ОПТИКА

III. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

ИБ № 3357

Владимир Алексеевич Буров,
Борис Сергеевич Зворыкин,
Алексей Петрович Кузьмин,
Александр Андреевич Покровский,
Иван Михайлович Румянцев

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФИЗИКЕ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Часть 2. Колебания и волны. Оптика. Физика атома

Редактор *А. И. Юдина*
Переплет художника *Б. К. Мирошина*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *В. Ф. Коскина*
Корректоры *К. А. Иванова и В. Г. Соловьева*

Сдано в набор 27.06.78. Подписано к печати 14.12.78. 60×90¹/₁₆. Бум. типогр. № 2. Гарн. литер. Печать высокая. Усл. печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 18,74. Тираж 100 000 экз. Заказ № 1357. Цена 80 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Полиграфический комбинат им. Я. Коласа Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 220005, Минск, Красная, 23.